

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ELEKTRIFIKACE A ŘÍZENÍ PROTOTYPU 3D TISKÁRNY

ELECTRIFICATION AND CONTROL SYSTEM INTEGRATION INTO THE 3D PRINTER PROTOTYPE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Pavelka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Arm

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Martin Pavelka

ID: 195411

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Elektrifikace a řízení prototypu 3D tiskárny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte 3D tiskárnu, která je obohacena o funkci vyložení hotového výtisku. Pomocí vhodných komponent implementujte elektrickou instalaci, která bude obsahovat standardní řízení. Funkce řídicí desky otestujte pomocí standardního ovládacího software.

- 1) Vyberte vhodné komponenty pro elektrifikaci.
- 2) Navrhněte schéma elektrického zapojení.
- 3) Realizujte elektrifikaci, integrujte řízení a oživte stroj.
- 4) Implementujte a nakonfigurujte softwarové vybavení.
- 5) Ověřte funkčnost a vyhodnoťte dosažené vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Patrick Hood-Daniel. Build Your Own CNC Machine. Apress, 2009. ISBN: 978-1430224891.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Jakub Arm

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se věnuje oblasti 3D tisku. Stručně shrnuje historii, technologie a materiály. Věnuje se především konstrukčnímu řešení 3D tiskárny s funkcí automatického vykládání tiskové podložky. Výběrem elektrických komponent pro elektrifikaci a realizaci návrhu. Pozornost je věnována také oživení a kalibraci stroje.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, návrh, elektrifikace, automatické vykládání, 3D tiskárna, prototyp

ABSTRACT

This thesis addresses the area of 3D printing. Briefly summarizes history, technology and materials. It's focused mainly on the construction of a 3D printer with the function of automatic unloading of the printing bed. Selection of electrical components for electrification and design implementation. Attention is also paid to revive and calibrate the machine.

KEYWORDS

3D printing, design, electrification, automatic unloading, 3D printer, prototype

PAVELKA, Martin. *Elektrifikace a řízení prototypu 3D tiskárny*. Brno, 2020, 55 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. Jakub Arm

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Elektrifikace a řízení prototypu 3D tiskárny“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jakubu Armovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych poděkoval vedení firmy MHI servis s.r.o. za poskytnutí zázemí pro stavbu tiskárny.

Obsah

Úvod	9
Cíle semestrální práce	10
1 Teoretická část	11
1.1 Historie 3D tisku	11
1.2 Technologie 3D tisku	12
1.2.1 FDM - Fused Deposition Modeling	12
1.2.2 SLA - Stereolithography	13
1.2.3 DLP - Digital Light Processing	14
1.2.4 SLS - Selective Laser Sintering	15
1.2.5 Další technologie	16
1.3 Detail FDM/FFF technologie	17
1.3.1 varianty podavače materiálu	17
1.3.2 Druhy materiálů	18
2 Konstrukce	19
2.1 Vlastní návrh	20
3 Výběr elektrických komponent	25
3.1 Řídící jednotka	25
3.2 Pohon	25
3.3 HeatBed	27
3.4 Solid State Relay	28
3.5 Koncové spínače	28
4 Elektrické schéma	31
5 Softwarové vybavení	33
5.1 Slicer	33
5.2 Firmware	35
5.2.1 Marlin	35
6 PID regulátor	36
6.1 Identifikace soustavy	36
6.2 Měření přechodové charakteristiky extruderu	37
6.3 Návrh regulátoru metodou Ziegler-Nichols	38
6.3.1 Určení kritických parametrů z přechodové charakteristiky	38
6.3.2 Výpočet parametrů PID regulátoru	38

6.4	Zhodnocení kvality regulace Z-N metody	39
6.5	Návrh regulátoru metodou Chien–Hrones–Reswick	40
6.6	Zhodnocení kvality regulace CHR metody	41
7	Automatické vykládání - pásový dopravník	42
7.0.1	Vývojový diagram softwaru pro pásový dopravník	43
8	Ověření funkčnosti a vyhodnocení dosažených vlastností	44
8.1	Kalibrace před prvním tiskem	44
8.2	Rozšířený proces 3D tisku	46
	Závěr	47
	Literatura	48
	Seznam příloh	50
A	Obsah přiloženého CD	51
B	Elektrické schéma	52
B.1	Elektrické schéma 1. list	52
B.2	Elektrické schéma 2. list	53
B.3	Elektrické schéma 3. list	54
B.4	Elektrické schéma 4. list	55

Seznam obrázků

1.1	Princip FDM technologie	12
1.2	Princip SLA technologie	13
1.3	Princip DLP technologie	14
1.4	Princip SLS technologie	15
1.5	Bowden vs Direct	17
2.1	Původní konstrukce	19
2.2	Hliníkový profil	20
2.3	Prvotní návrh rámu tiskárny	20
2.4	Návrh tiskárny s myšlenkou odjištění podložky	21
2.5	První návrh pásového dopravníku	22
2.6	Upravený návrh pásového dopravníku	23
2.7	Detail zajištěné pojistky	24
2.8	Detail odjištěné pojistky	24
3.1	Momentová charakteristika motoru SX17-1005LQCEF	27
3.2	Ideální spínací charakteristika	28
3.3	Skutečná spínací charakteristika se špičkovým šumem	29
3.4	Spínací charakteristika se Softwarovým filtrováním	29
3.5	Koncový spínač s RC filtrem	30
3.6	Spínací charakteristika s Hardwarovým filtrováním	30
4.1	Síťový konektor C14 s vypínačem a pojistkou	31
4.2	Rozložení pinů konektoru CAN 15	32
5.1	Ukázka G-kódu	34
6.1	Přechodová charakteristika extruderu	37
6.2	Vzorce pro návrh parametrů regulátoru metodou Ziegler-Nicholse	38
6.3	Přenos řízení Z-N	39
6.4	Přenos řízení CHR	41
7.1	DPS řízení dopravníku	42
7.2	Vývojový diagram softwaru pro pásový dopravník	43
8.1	První výtisk kalibrační kostky	44
8.2	Kalibrační kostka tištěná s jedním perimetrem	45
8.3	Blokové schéma rozšířeného procesu 3D tisku	46

Úvod

Tato práce se věnuje oblasti 3D tisku. Poslední dobou se stal 3D tisk velmi populární a rozšířenou technologií. V podstatě se jedná o inverzní obrábění, kdy se materiál tvořící dílec neobrábí, ale naopak se materiál přidává. Tisk probíhá natavováním termoplastu nebo spékáním fotopolymeru pomocí světla, který se postupně vrství dokud nevznikne požadovaný tvar. K dosažení požadovaného tvaru je nutné mít digitální data v podobě 3D modelu. Ten lze navrhnout pomocí grafického software (SolidWorks, Fusion360, atd.) nebo lze využít technologii 3D skenování, pomocí které se fyzický model převede na virtuální data. Díky vývoji tisknutelných materiálů se stal 3D tisk hojně využívanou technologií nejen při prototypování výrobků, ale i při tvorbě finálních produktů a konstrukčních prvků.

Cíle semestrální práce

Cílem této práce je navrhnout, zkonstruovat, elektrifikovat a oživit prototyp 3D tiskárny, který bude připraven bez většího zásahu obsluhy nepřetržitě tisknout. K docílení tohoto ideálu bude navržen automatický mechanismus obsluhující výměnu tiskové podložky, který předá tiskovou podložku obslužnému manipulátoru. Ten se postará o to, aby došlo k výměně potisknuté podložky za prázdnou, připravenou pro tisk.

1 Teoretická část

1.1 Historie 3D tisku

Historie 3D tisku se mapuje od 70. let 20. století, kdy byl koncept 3D tisku poprvé zmíněn v časopise New Scientist. V 80. letech Charles W. Hull podal patent na stereolitografii. O pár let později získává patent, zakládá společnost 3D systems a vyvíjí první 3D tiskárnu. Na konci 80. let je již veřejnosti dostupná první tiskárna s názvem SLA 250 od společnosti 3D systems. Na počátku 90. let byl 3D tisk vnesen do prototypové výroby součástek v leteckém a automobilovém průmyslu. Na přelomu 20. a 21. století vzniká ve Velké Británii na univerzitě v Bath projekt s názvem RepRap. V roce 2012 se v Nizozemsku lékařům podařilo úspěšně pacientovi implantovat vytištěnou spodní čelist [3].

1974 První zmínka o konceptu 3D tisku byla zveřejněna v časopise New Scientist Britským chemikem David E. H. Jones [1].

1984 Charles W. Hull podává patent na stereolitografii [2].

1986 Charles W. Hull vyvíjí první skutečnou 3D tiskárnu SLA-1 a zakládá společnost 3D systems, získává patent.

1988 První veřejně dostupná 3D tiskárna s názvem SLA 250 od firmy 3D systems.

1992 3D tisk vnesen do prototypové výroby součástek v leteckém a automobilovém průmyslu [3].

1995 Fraunhoferův institut vyvinul proces selektivního tavení laserem [6].

1999 Vytvoření částí orgánu potažené pacientovými vlastními buňkami.

2005 Dr. Adrian Bowyer zakládá na Univerzitě v Bath projekt s názvem RepRap.

2008 První verze 3D tiskárny z projektu RepRap s názvem Darwin.

2009 Druhá verze z projektu RepRap s názvem Mendel, která byla menší a rychlejší.

2010 Třetí verze s názvem Huxley, která byla ještě menší. Přišla další RepRap tiskárna, kterou vyvinul Jozef Průša. Jednalo se o rozšířenou předchozí verzi Mendel.

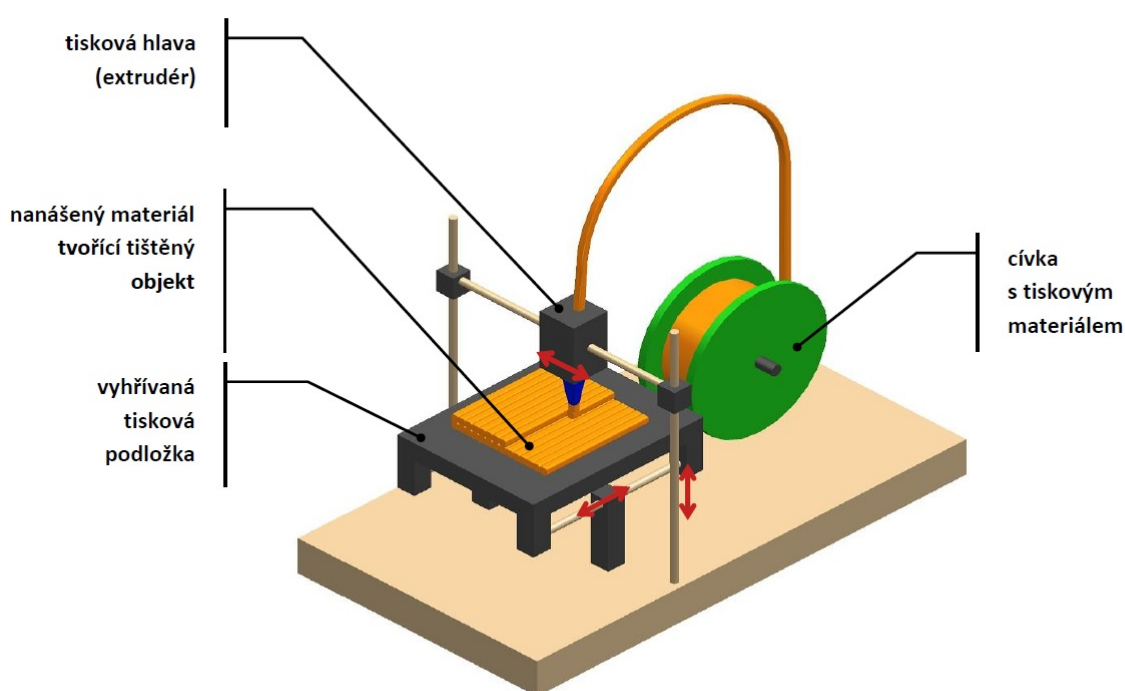
2011 Vědci na Cornell University oznamují vývoj 3D tiskáren na výrobu jídla.

2012 Nizozemští lékaři implantují vytištěnou spodní čelist [3].

1.2 Technologie 3D tisku

1.2.1 FDM - Fused Deposition Modeling

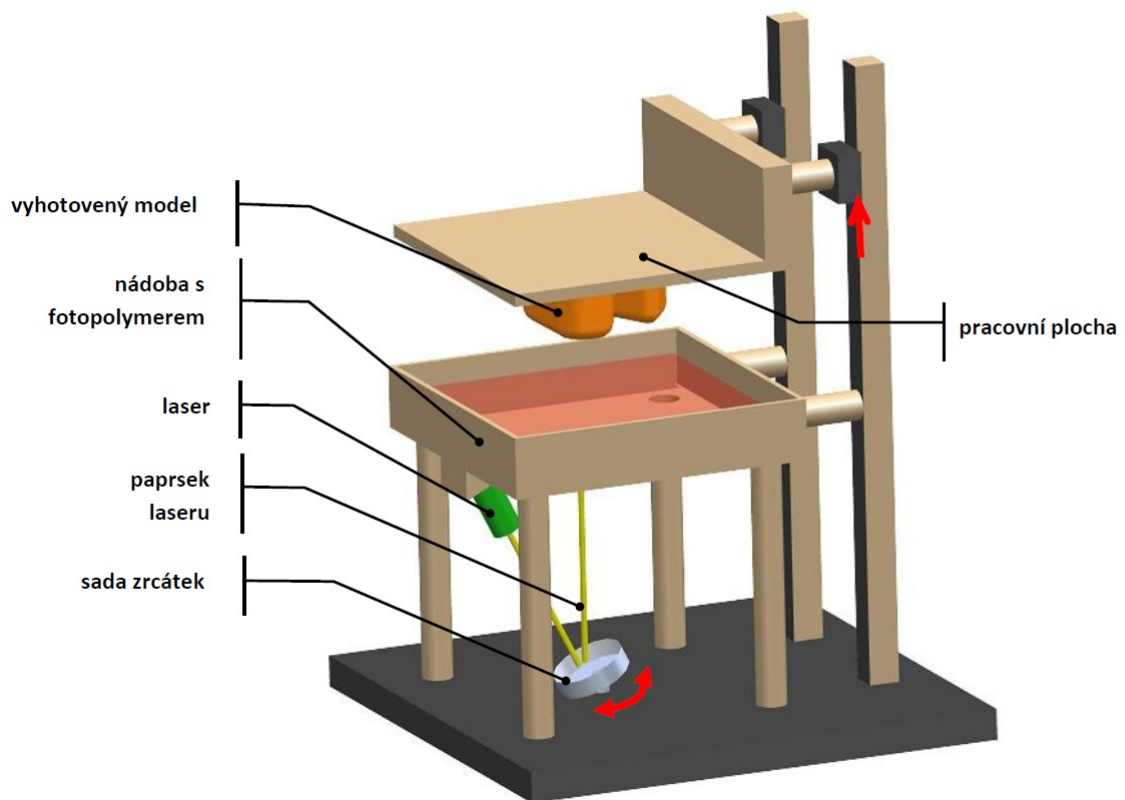
Dnes nejrozšířenější a nejdostupnější technologie 3D tisku. FDM/FFF jsou stejné technologie, avšak FDM je registrovaná ochranná značka společnosti Stratasys a ostatní výrobci ji nesmějí používat. Termoplast v podobě struny nejčastěji o průměru 1,75 mm je pomocí vyhřívané trysky, přes kterou prochází, natavován a vrstven na tiskovou podložku, kde chladne a postupným vrstvením vzniká požadovaný objekt. Dnešní tiskárny používají vyhřívané podložky, které zlepšují přilnavost. Díky vyhřívání podložky je možné tisknout materiály které mají nižší adhezi. Nevýhodou je hrubší povrch a menší detail oproti SLA technologii. Výhodou je rychlejší tisk použitelný i pro konstrukční díly.



Obr. 1.1: Princip FDM technologie [9].

1.2.2 SLA - Stereolithography

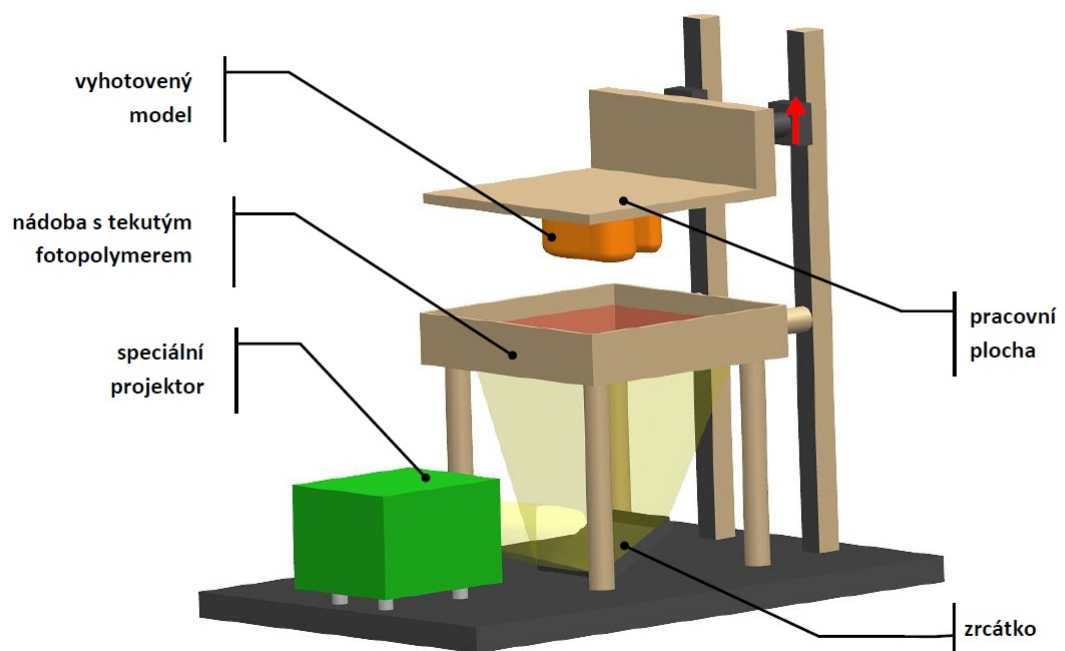
Stereolitografie je nejstarší technologie používaná od roku 1986. Využívá tekutého fotopolymery, který je vytvrzován pomocí laserového paprsku. Jedná se o dražší technologii, avšak postupným rozšiřováním se stává dostupnější. Velkou výhodou SLA technologie je velká přesnost a hladký povrch, díky přesnému bodovému vytvrzování laserem. Nevýhodou je dlouhá doba tisku, křehkost výtisku - nevhodné pro mechanické díly.



Obr. 1.2: Princip SLA technologie [9].

1.2.3 DLP - Digital Light Processing

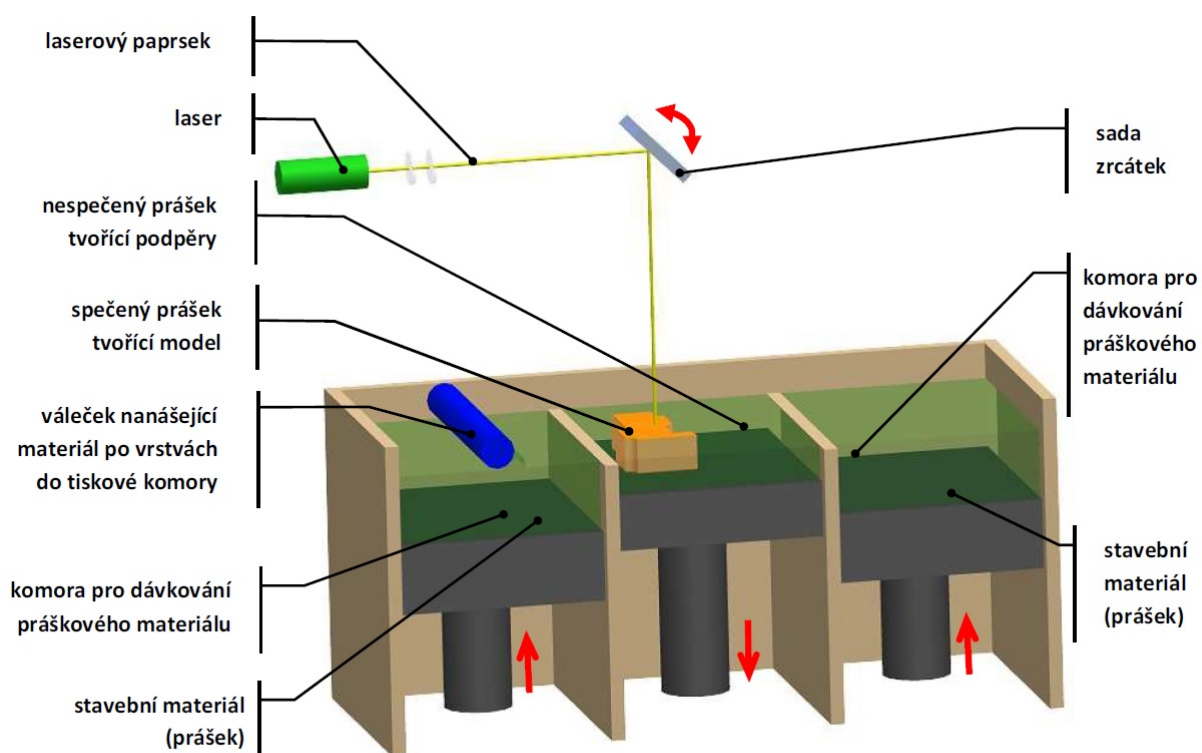
Jedná se o nejnovější technologii využívanou v 3D tisku. Je založena na nasvícení fotopolymeru UV projekcí modelového řezu. Jedná se v podstatě o plošnou technologii SLA, zde se naexponuje pouze jeden bod, ale celá vrstva najednou pomocí projektoru. Velkou výhodou je tedy rychlost tisku oproti SLA. Výrobky vytištěné pomocí této technologie mají v podstatě úplně hladký povrch. Velkou nevýhodou je životnost materiálu.



Obr. 1.3: Princip DLP technologie [9].

1.2.4 SLS - Selective Laser Sintering

SLS technologie je založena na spékání práškového materiálu laserovým paprskem. Při této technologii se na podložku nanese souvislá vrstva prášku, který je v zásobníku udržován při teplotě blížící se teplotě tavení. Poté se pomocí laserového paprsku slinuje prášek a vytvoří pevnou strukturu. Následně se podložka posune směrem dolů a proces se opakuje. Velkou výhodou je, že materiál který není slinován tvoří podpěry objektu. Nespečený prášek se po dokončení tisku pouze vysype zpět do zásobníku a může být dále použit. Jako materiál se používá písek, kov, plast nebo keramika [3, 7].



Obr. 1.4: Princip SLS technologie [9].

1.2.5 Další technologie

MJ - Material Jetting

SLM - Selective Laser Melting

LOM - Laminated Object Manufacturing

DOD - Drop on Demand

EBM - Electronic Beam Melting

1.3 Detail FDM/FFF technologie

1.3.1 varianty podavače materiálu

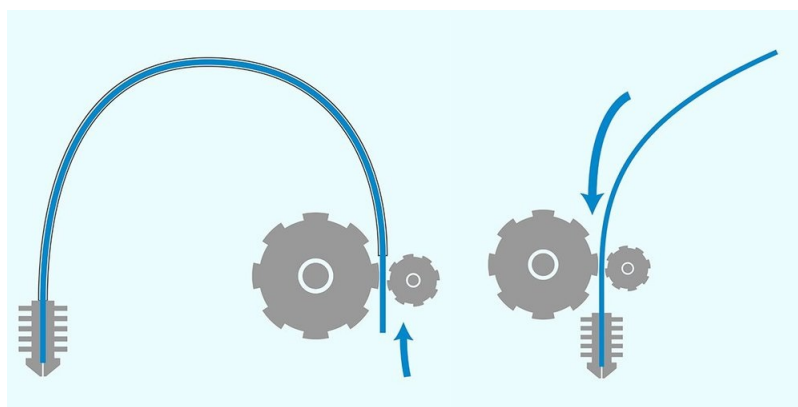
Při konstrukci 3D tiskáren za použití FDM/FFF technologie jsou dva způsoby, kterými se materiál dopravuje do trysky. Dva způsoby jsou především kvůli výhodám/-nevýhodám obou variant.

Direct drive

Direct drive extruder spočívá v umístění krokového motoru pro posun materiálů co nejblíže trysce. Velkou výhodou použití direct principu je možnost tisku flexibilních materiálů. Další výhodou je zrychlení tzv. retrakce. Retrakce je jev, při kterém se tisková struna vytáhne z trysky, aby při přejezdu mimo tisknutý objekt nedocházelo k nechtěnému vytékání materiálu z trysky. Značnou nevýhodou je zvýšená hmotnost tiskové hlavy, což má za následek nižší akcelerace.

Bowden drive

Bowden drive značí nutnost použití bowdenu, který spojuje tiskovou hlavu a mechanismus s krokovým motorem pro dopravu materiálu. Jako bowden se používá teflonová trubička s vnitřním průměrem nejbližším tiskové struně, především proto, aby nedocházelo k ohýbání struny uvnitř. Dominantní výhodou je značné odlehčení tiskové hlavy a následné použití vyšších akcelerací. Při použití bowdenu je znemožněn tisk flexibilních materiálů. Retrakce musejí být delší a tím se může doba tisku prodloužit [8].



Obr. 1.5: Bowden drive (vlevo), Direct drive (vpravo) [8].

1.3.2 Druhy materiálů

Materiály pro tisk jsou tzv. termoplasty. Dostupné jsou v podobě struny, která je navinuta na cívce. Každý materiál má svůj tzv. Optimální tavný index (MFI), jedná se o teplotu při které má materiál ideální konzistenci pro tisk. Nárok je kladen především na stálost průměru struny, nejčastěji s tolerancí 0.05mm. Dalším parametrem je barevná stabilita. Tři nejběžnější materiály:

PLA - Polylactic Acid

PLA - Poly Lactic Acid neboli kyselina polylaktická patří mezi nejpoužívanější materiály. Jedná se o biologicky odbouratelný polymer. Vyrábí se např. z Dextrózy extrahované z cukrové třtiny nebo kukuřičného škrobu. Materiál je značně hydro-skopický, tudíž se musí skladovat v suchém prostředí. Teplota trysky pro tisk PLA se pohybuje v rozmezí 190 až 220°C. Velkou výhodou je nízká teplotní roztažnost, díky které lze tisknout i rozsáhlejší objekty. Nevýhoda tohoto materiálu spočívá v nízké teplotní odolnosti, to znamená, že při cca 60°C měkne. Špatně se opracovává broušením, kvůli teplotní odolnosti. PLA lze lepit kyanoakrylátovými lepidly.

ABS - Akrylonitril-butadien-styren

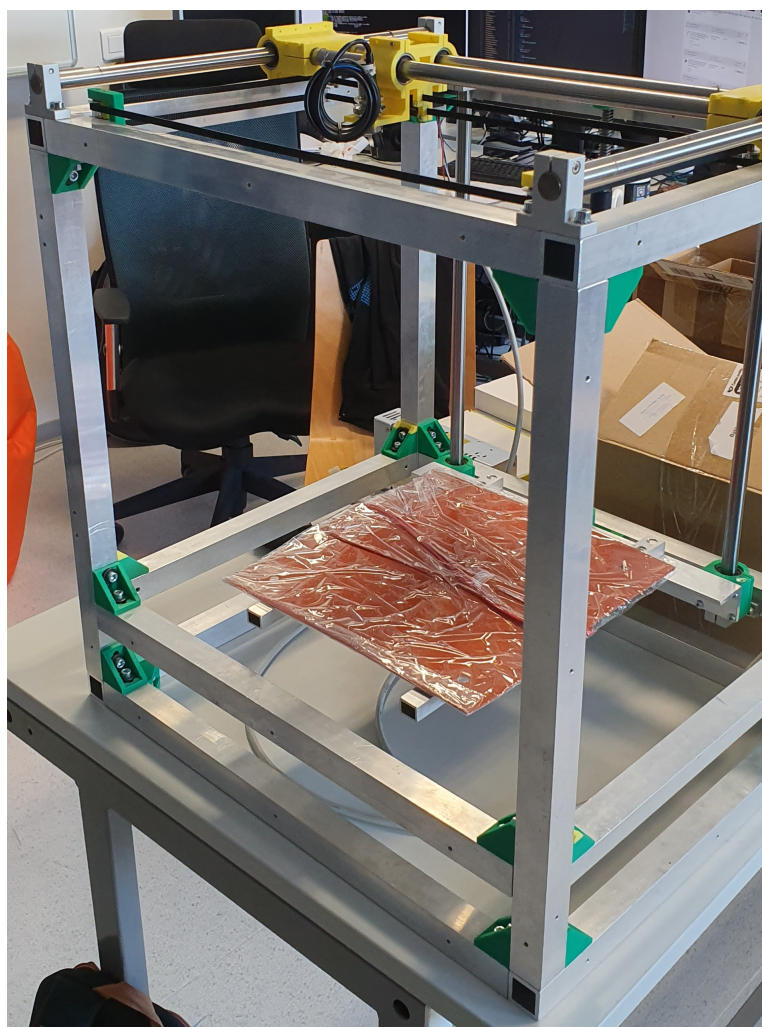
Jedná se o amorfnní termoplastický kopolymer. Vyniká především svou houževnatostí a odolností vůči mechanickému poškození. Je odolný vůči kyselinám, louhům, uhlovodíkům, olejům a tukům. Málo nasákavý a zdravotně nezávadný. Teplota trysky pro tisk ABS se pohybuje v rozmezí 210 až 230°C. Velkou nevýhodou ABS je velká teplotní roztažnost, která se pohybuje okolo 0,3-0,7 %, což znemožňuje tisk rozsáhlejších objektů. Pro potlačení teplotní roztažnosti je nutné vyhřívat podložku na 80-110°C. Teplotní odolnost se pohybuje okolo 100°C. ABS se dá lehce opracovat např. broušením. Za použití acetonových výparů lze u ABS docílit hladkého povrchu objektu. Lepení je možné za použití acetonu, který naleptá povrch.

PET/PET-G - polyetylén tereftalát-glykol

PET-G je amorfnní kopolyester, který jako ABS vyniká odolností vůči mechanickému poškození. V mnoha parametrech je shodný s ABS jako je houževnatost, minimální nasákavost a zdravotní nezávadnost. PET-G je odolný vůči zředěným roztokům kyselin, solí, mýdel i zásad. Odolává i sterilizaci pomocí gama paprsků a ethylenoxidu. Naopak jej mohou poškodit nebo rozpustit ketony, aromatické a halogenové uhlovodíky. Teplota trysky pro tisk PET-G se pohybuje okolo 235°C. Značná výhoda PET-G je v jeho nízké teplotní roztažnosti srovnatelné s PLA, při zachování mechanické odolnosti ABS. Tisk je nutný na vyhřívanou podložku, vyhřátou na cca 80°C. PET-G lze lepit stejně jako PLA kyanoakrylátovými lepidly [5].

2 Konstrukce

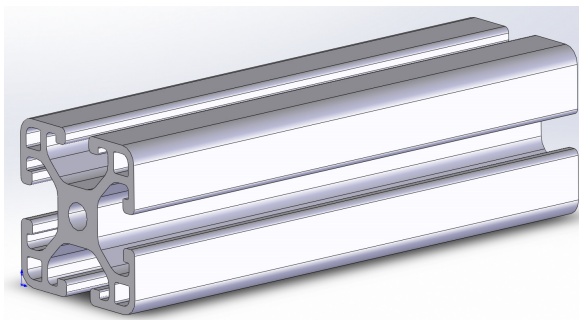
Předmětem téhle práce bylo elektrifikovat dodanou konstrukci 3D tiskárny. Po bližším ohledání konstrukce bylo nutné zvolit jiné řešení celkového rámu, protože nevyhovoval požadavkům vedoucího práce. Vedoucí práce požadoval, aby bylo možné tiskárny stohovat resp. skládat na sebe či vedle sebe bez omezení. Tomuto parametru nevyhovovalo řešení lineárního vedení os X a Y, které bylo umístěno nad konstrukcí. Další požadavek byl na uzavření konstrukce pro minimalizaci vlivu okolního prostředí, zejména kolísání teploty, což má za následek zlepšení tiskových parametrů především materiálů na bázi ABS a jemu podobných, které mají relativně velkou teplotní roztažnost a změny teplot mohou průběh tisku komplikovat. Po vzájemné dohodě jsem přistoupil na vlastní návrh kompletní 3D tiskárny.



Obr. 2.1: Původní konstrukce.

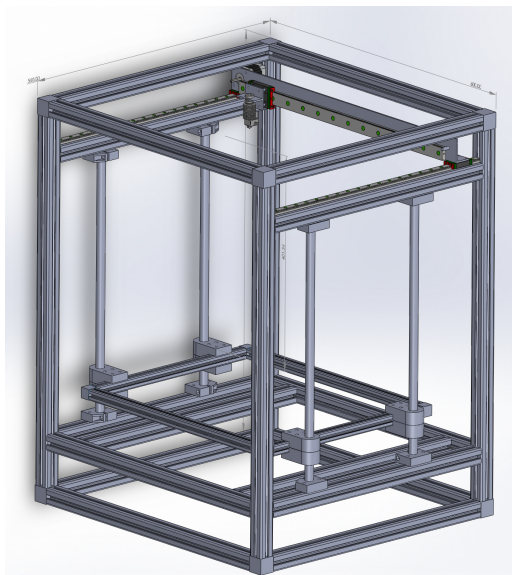
2.1 Vlastní návrh

Vlastní návrh tzv. boxové tiskárny vychází především z mých zkušeností se stavbou 3D tiskáren, které byly následně vedoucím práce upravovány. Návrh je vytvořen v elektronické podobě v software SolidWorks. Nejzásadnějším parametrem bylo, myslet na jednoduché uzavření vně konstrukce. Jako základ konstrukce tvoří normalizovaný hliníkový profil 30x30 mm , který má dostatečnou pevnost na konstrukce typu 3D tiskárny.



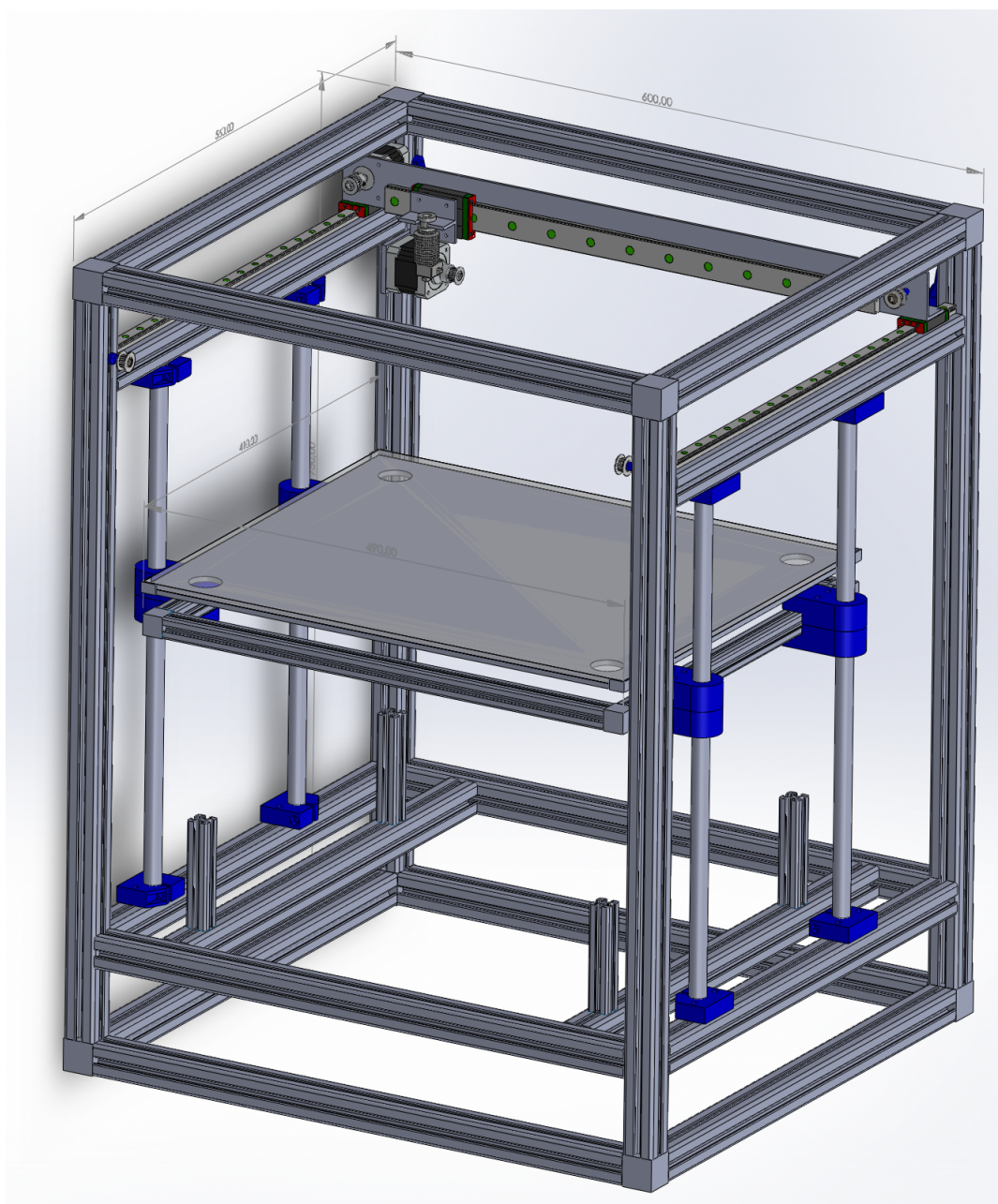
Obr. 2.2: Hliníkový profil.

Následně jsem pomocí těchto profilů vymodeloval rám. Rozměrově byl upravován vzhledem k nakoupeným součástkám, které se použijí z původní konstrukce.



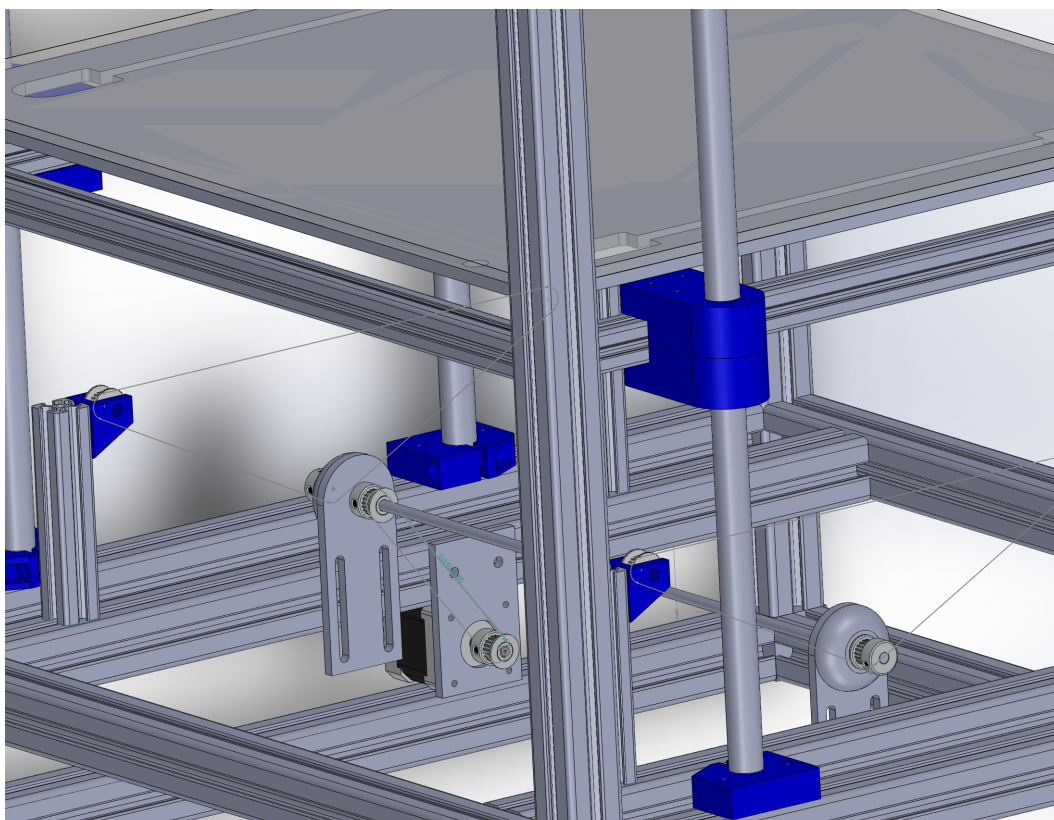
Obr. 2.3: Prvotní návrh rámu tiskárny.

Dalším požadavkem byla automatizace tiskárny. Tím se rozumí to, že tiskárna bude schopná tisknout nepřetržitě bez zásahu obsluhy. U běžných 3D tiskáren je nutné po dokončení tisku manuálně oddělit vytisknutý díl. Proto bylo navrženo řešení, které bude schopno po dokončení tisku odjistit tiskovou podložku (v konkrétním případě 5mm sklo) od vyhřívaného hliníkového plátu a následně se manipulátor postará o výměnu za prázdnou tiskovou podložku a bude možné tisknout další díl.



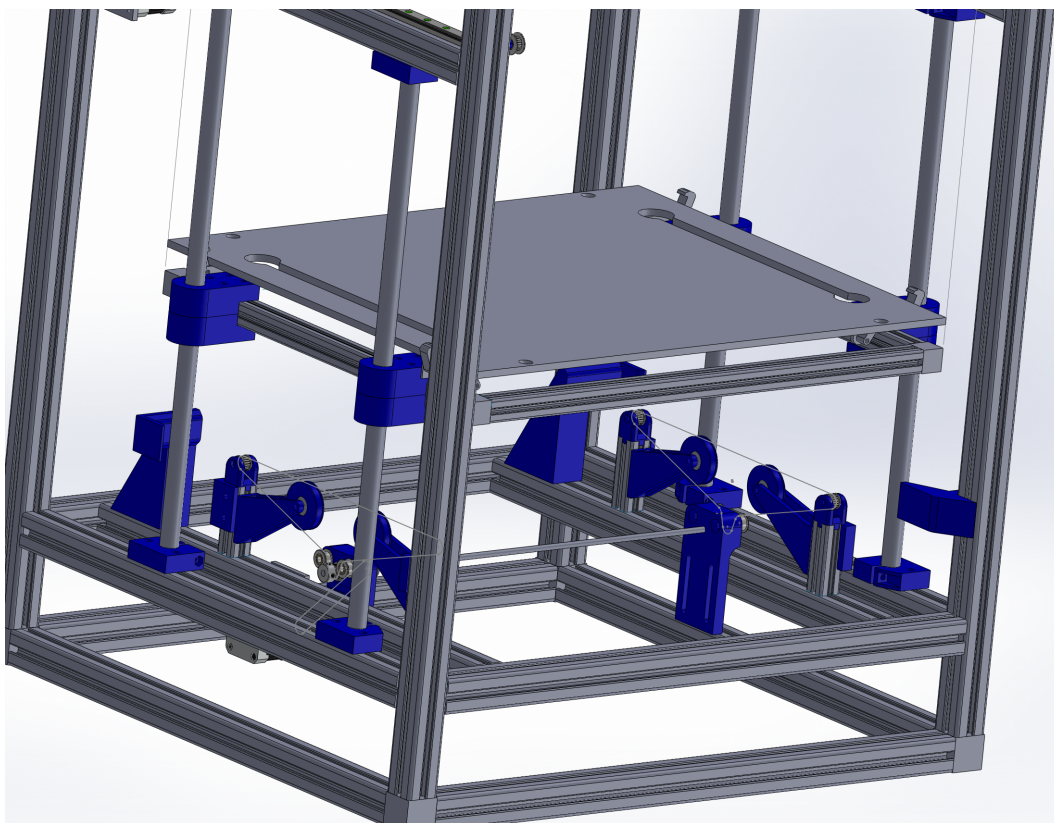
Obr. 2.4: Návrh tiskárny s myšlenkou odjistění podložky.

Myšlenka spočívala v tom, že se při tisku pohybuje tisková podložka směrem dolů. Jakmile by tiskárna dokončila tisk, tak by se podložka posunula ještě níže, kde by se sklo odjistilo od hliníkové desky a zůstalo by stát na vyobrazených čtyřech bodech. Tím by se vytvořil prostor pro vidlici manipulátoru. Avšak při konstrukci manipulátoru se ukázalo, že manipulátor nebude schopný tiskovou podložku vyjmout z tiskárny, tak bylo nutné systém přepracovat. Tiskovou podložku bylo nutné vysunout z tiskárny. Přidáním pásového dopravníku se zajistí, aby tisková podložka byla vysunuta před hranici tiskárny, kde je schopný si ji manipulátor převzít.



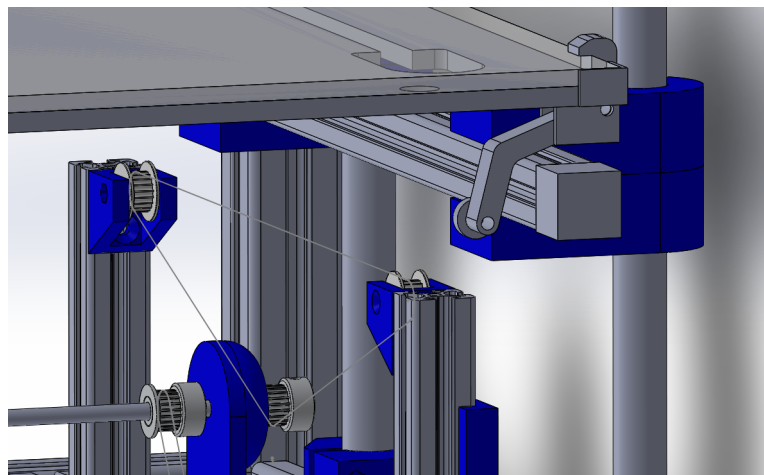
Obr. 2.5: První návrh pásového dopravníku.

Tohle první řešení bylo následně upraveno z důvodu absence podepření pásu a nedostatečné styčné ploše na ozubené řemenici. Ozubený řemen by na ní mohl jednoduše přeskakovat. Dále bylo přepracováno umístění pro rolny tvořící dosedací body, hlavně z důvodu co nejmenšího ubrání materiálu z hliníkové desky. Oba pásy jsou spřaženy pomocí 5mm tyče, která zaručí synchronní pohyb obou pásů. Nutné bylo též zaručit dopravení nového skla na požadovanou pozici, z toho důvodu byly přidány naváděcí elementy připevněné na svislých profilech a také dorazy s koncovými spínači.

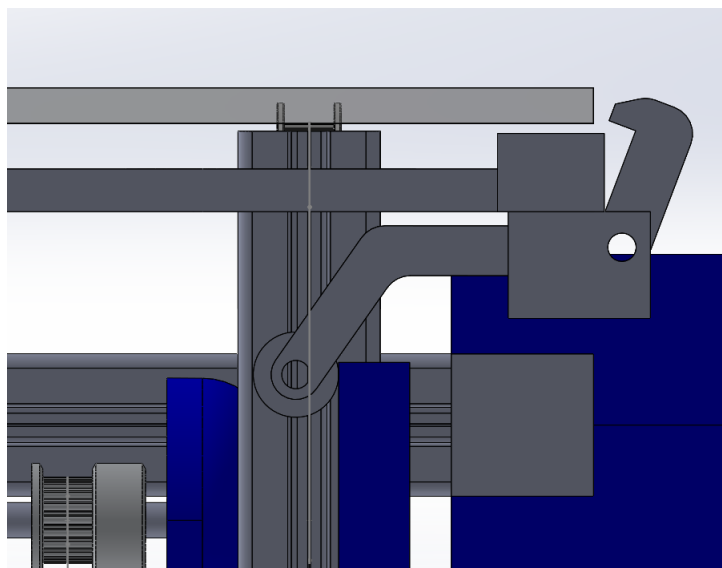


Obr. 2.6: Upravený návrh pásového dopravníku.

Princip zajištění tiskové podložky je navržen čistě na mechanickém principu. O zajištění pojistky se stará pružinka, která dotlačí pojistku k tiskové podložce. Pohybem celého rámu heatbedu směrem dolů, dojde ke kontaktu ložiska pojistky s plastovým vedením, které pojistku stálým pohybem směrem dolů otevírá. Sklo je odjištěno, proběhne výměna za prázdné a proces pokračuje tím, že rám heatbedu jede směrem nahoru, sklo dosedne na hliníkovou desku a začínají se pojistky zavírat. Jakmile ložisko pojistky ztratí kontakt s plastovým vedením, pojistka je zajištěná.



Obr. 2.7: Detail zajištěné pojistky.



Obr. 2.8: Detail odjištěné pojistky.

3 Výběr elektrických komponent

3.1 Řídící jednotka

Většina dnešních běžně dostupných tiskáren obsahuje řídící jednotky s 8-bit procesorem. Tyto řídící jednotky jsou ve většině případů dostačující, avšak na trhu se již objevují jednotky s výkonnějšími procesory, které nabízí široké množství zkvalitnění tisku. K řízení celé tiskárny byla vybrána řídící jednotka BIGTREETECH SKR v1.3. Hlavně z důvodu osazení 32-bit procesorem ARM cortex-M3. Jedná se o 4- vrstvý plošný spoj na kterém jsou mimo procesoru osazeny spínací prvky pro řízení: např. vyhřívání HotEndu, vyhřívání HeatBedu, ventilátorů, atd. Dále umožňuje osazení až 5-ti driverů s 256 mikrokroky pro řízení krokových motorů. Použitím driverů TMC2208-UART, které jednotka podporuje, lze pomocí UART módu měnit parametry pomocí firmware.

3.2 Pohon

Převážná většina 3D tiskáren využívá pro pohon všech os i extruderu krokové motory bez zpětné vazby. Existují i krokové motory se zpětnou vazbou, avšak jsou velmi drahé a jejich řízení je složitější. Princip krokového motoru spočívá v postupném spínání cívek statoru. Pomocí vytvořeného magnetického pole je rotor motoru polohován. Nejdostupnější krokové motory mají délku kroku 1.8° , ale existují i motory s poloviční délkou kroku tj. 0.9° . Následně lze tento krok rozdělit až na 256 mikrokroků. Výhodou krokových motorů je především jejich mechanická odolnost a bezúdržbový provoz. Krokové motory mají i nevýhody a ty mohou nastat převážně při překročení mezního zatížení. Pro pohyb všech os (X,Y,Z) extruderu i dopravníku byly vybrány dvoufázové krokové motory NEMA SX17-1005VLQCEF. Vhodné jsou převážně díky parametrům rychlosti a momentu viz. obr. č. 3.1. Napájeny budou 24V, což není to úplně ideální napájecí napětí vzhledem k momentové charakteristice, ale značně se zjednoduší řídící elektronika. Výběr konkrétního motoru je zdůvodněn výpočtem na následující straně.

Výpočet zatížení motoru pro osu Y.

$$F = m * a = 2 * 3 = 6N \quad (3.1)$$

Kde F - síla nutná k posunutí vozíku [N], m - odhadovaná hmotnost Y vozíku [kg],
 a - běžně používané zrychlení 3m/s^2 .

Dále je nutné sílu F přepočíst na moment.

$$M = F * r = 6 * 0.0065 = 0,039Nm \quad (3.2)$$

Kde M - nutný moment motoru [Nm], r - poloměr řemenice na motoru [m].

Výpočet zatížení motoru pro osu X s **bowden** extruderem

$$F = m * a = 0.5 * 3 = 1.5N \quad (3.3)$$

Kde F - síla nutná k posunutí vozíku [N], m - odhadovaná hmotnost X vozíku [kg],
 a - běžně používané zrychlení 3m/s^2 .

Dále je nutné sílu F přepočíst na moment.

$$M = F * r = 1.5 * 0.0065 = 0,00975Nm \quad (3.4)$$

Kde M - nutný moment motoru [Nm], r - poloměr řemenice na motoru [m].

Výpočet zatížení motoru pro osu X s **direct** extruderem

$$F = m * a = 0.8 * 3 = 2.4N \quad (3.5)$$

Kde F - síla nutná k posunutí vozíku [N], m - odhadovaná hmotnost X vozíku [kg],
 a - běžně používané zrychlení 3m/s^2 .

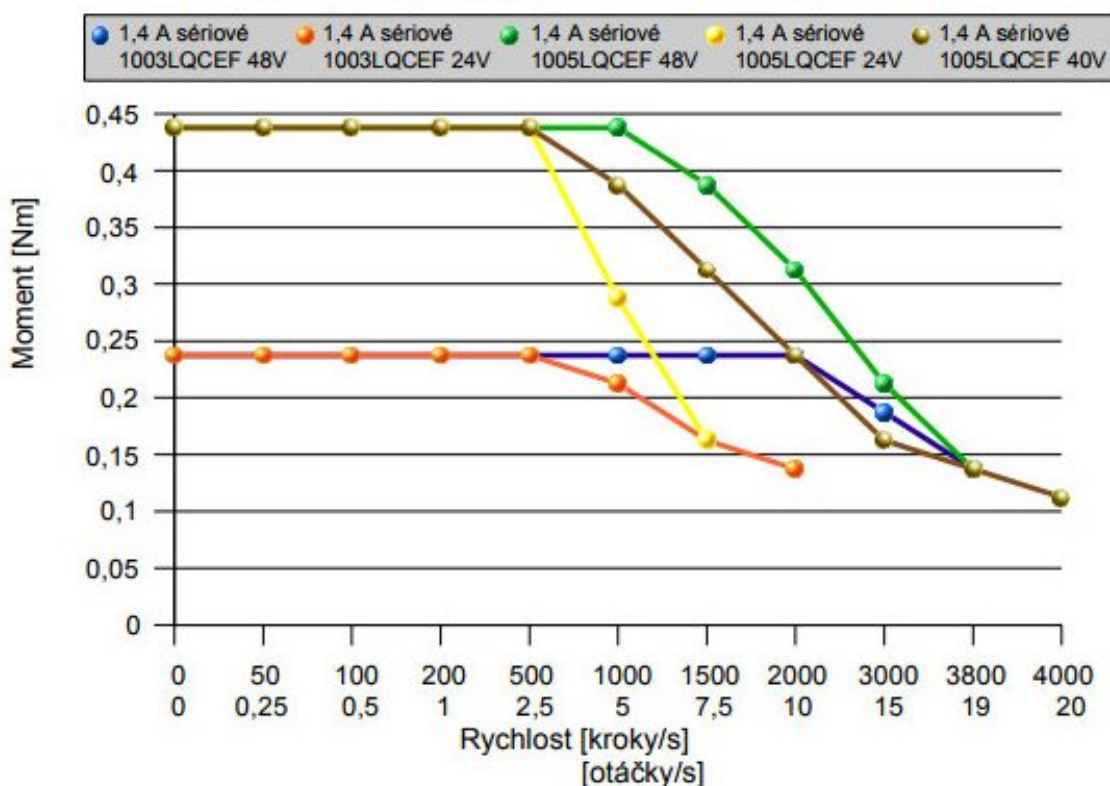
Dále je nutné sílu F přepočíst na moment.

$$M = F * r = 2.4 * 0.0065 = 0,0156Nm \quad (3.6)$$

Kde M - nutný moment motoru [Nm], r - poloměr řemenice na motoru [m].

Výpočtem se ověřilo, že vybraný krokový motor má dostatečnou sílu pro pohon os X a Y. Udávaný katalogový moment motoru je 0.52Nm. Z výpočtu vyplývá, že krokový motor je dostatečně výkonově dimenzován i když nebylo započteno tření.

Momentová charakteristika motoru SX17-1003LQCEF, SX17-1005LQCEF s CD30x, CD30M (24; 48 VDC); SX17-1005LQCEF s SD14RE (40 VDC)



Obr. 3.1: Momentová charakteristika motoru SX17-1005LQCEF [4].

3.3 HeatBed

HeatBed je vyhřívací podložka tvořená odporovým drátem nebo vytvořením odporové cesty na desce plošného spoje. Tím pádem mohou vzniknout buď v pevném provedení tj. vyleptáním mědi na desce plošného spoje nebo částečně flexibilní, namotáním odporového drátu na libovolný podklad. Dostupné jsou v různých výkonových třídách. Nejčastějším napájecím napětím je 12 nebo 24V, avšak existují i na 230V. Při použití HeatBedu na 230V se minimalizuje nutnost použití velkého průřezu vodiče vzhledem k protékajícímu proudu, který se při namáhání láme. Oproti variantě s napájecím napětím 12/24V je řízení složitější, kvůli nemožnosti připojení přímo do řídicí jednotky. Je nutné použít spínací prvek tzv. SS relé, které pomocí výstupu z řídicí jednotky spíná obvod s 230V.

3.4 Solid State Relay

Solid state relay (SSR) je polovodičový spínací prvek. Nahrazuje elektromagnetické relé, které je spíše vhodné pro spínání v delších časových intervalech. Oproti el. mag. relé, neobsahuje žádné mechanické prvky, tudíž nedochází např. k opotřebení spínacích kontaktů. SSR má galvanicky oddělený výstup od vstupu pomocí optočlenu. Existují provedení s DC vstupem tak i s AC vstupem. Relé je možné řídit pomocí PWM (pulzně šířková modulace), což je velká výhoda při regulaci teploty podložky.[11]

Konkrétní typ SSR byl vybrán na základě požadavků:

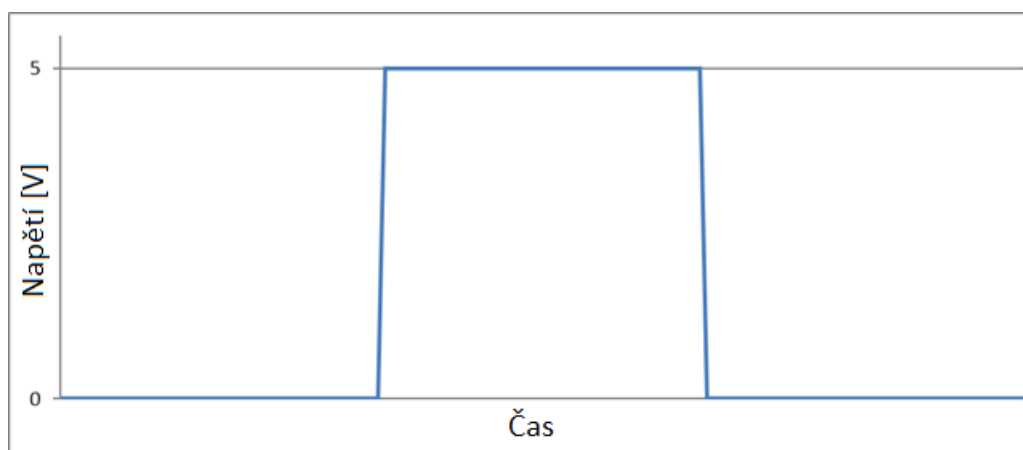
- DC vstup 0-24V
- spínaný výkon 750W
- spínané AC napětí 230V

Zvolený typ SSR: DMWD SSR-25 DA.

3.5 Koncové spínače

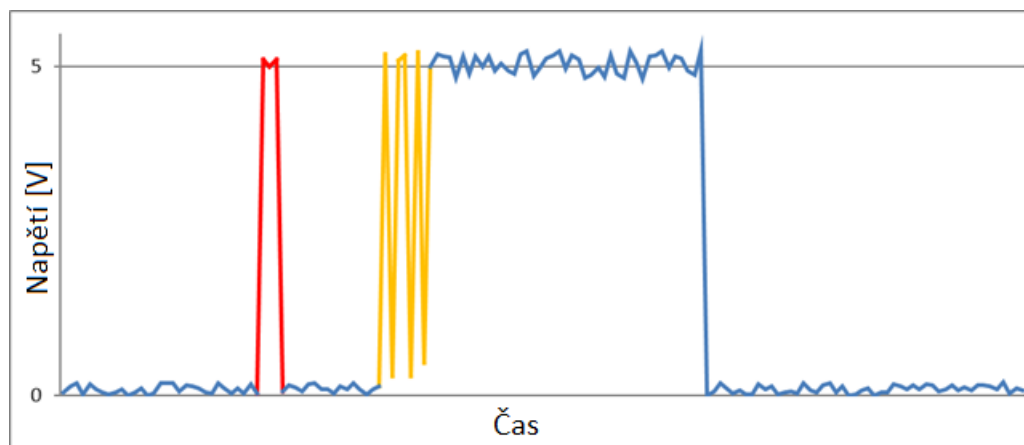
Koncové spínače slouží k určení výchozí pozice tiskové hlavy nebo určují minimální či maximální možnost pohybu osy. Existují různé varianty např.:

- Mechanický spínač
- Optická brána
- Hallův senzor



Obr. 3.2: Ideální spínací charakteristika [12].

Bohužel vlivem elektromagnetického rušení reálná spínací charakteristika vypadá spíše takto:

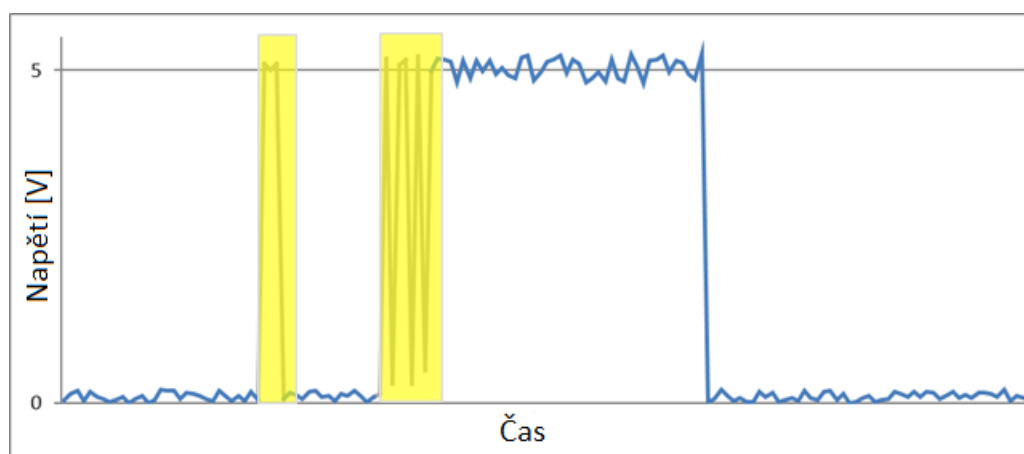


Obr. 3.3: Skutečná spínací charakteristika se špičkovým šumem [12].

Eliminaci elektromagnetického rušení lze řešit několika způsoby:

- Použití stíněných kabelů
- Úprava vedení signálových kabelů (distancovat napájecí vedení od signálových)
- Softwarové filtrování
- Hardwarové filtrování

Softwarové filtrování



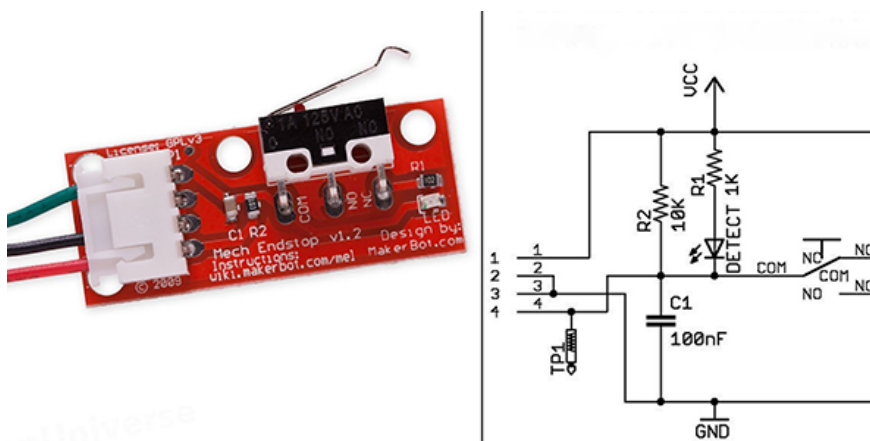
Obr. 3.4: Spínací charakteristika se Softwarovým filtrováním [12].

Žlutá oblast na obrázku č.3.4 znázorňuje oblast aktivního softwarového filtrování. V první žluté oblasti se nachází špička elektromagnetického rušení, kterou algorit-

mus vyhodnotit tak, že nedošlo ke změně stavu. Následující žlutá oblast znázorňuje skutečné sepnutí koncového spínače. Nyní algoritmus sleduje průběh křivky, dokud nevyhodnotí zda skutečně došlo k sepnutí nebo je třeba pouze filtrovat elektromagnetický šum. Při softwarovém filtrování dochází ke zpoždění signálu a to má za následek ztrátu přesnosti koncových spínačů.

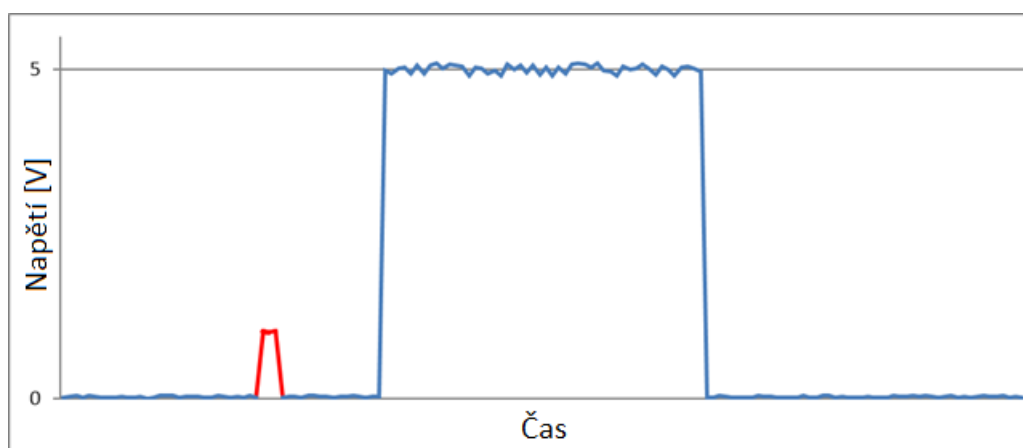
Hardwarové filtrování

Pro harwarové filtrování se nejčastěji používá kombinace rezistoru ($R2$) a kondenzátoru ($C1$) viz. Obr. č.3.5.



Obr. 3.5: Koncový spínač s RC filtrem [12].

Po použití RC filtru dojde k ořezání napětových špiček na úroveň napětí, které jednotka nepovažuje za spínací úroveň a nedochází k falešným signálům.



Obr. 3.6: Spínací charakteristika s Hardwarovým filtrováním [12].

4 Elektrické schéma

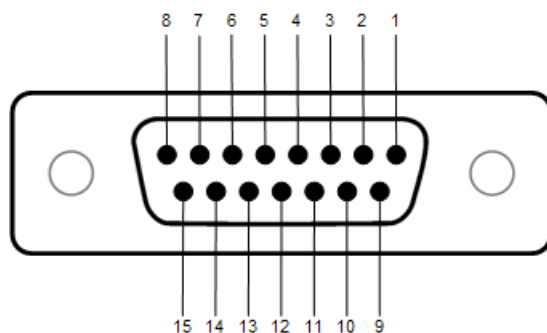
Pro připojení síťového napětí byl vybrán konektor do panelu typu C14 s integrovaným vypínačem a pojistkou. Konektor odpovídá standardu IEC 60320. Pomocí fastonů 4,8mm se konektor připojí dále do obvodu.



Obr. 4.1: Síťový konektor C14 s vypínačem a pojistkou [10].

Za konektorem, vypínačem a pojistkou následuje bezpečnostní okruh tvořen dvěma relé. První relé zajišťuje odpojení pomocí bezpečnostního tlačítka, umístěného přímo na rámu tiskárny. Druhé relé slouží k možnosti vzdáleného odpojení. Při stisknutí bezpečnostního tlačítka, dojde k odpojení veškerých komponent od elektrické energie. Možnost vzdáleného odpojení, odpojí primární zdroj 230/24V pro napájení elektroniky tiskárny, avšak sekundární zdroj 230/5V zůstává připojen, který zajišťuje napájení pro vzdálený přístup. Po bezpečnostním okruhu následuje připojení řízení vyhřívané podložky pomocí SSR, která je napájena 230V. Následuje napájecí zdroj 230/24V. Zdroj 24V slouží k napájení řídicí jednotky. K řídicí jednotce jsou připojeny krokové motory extruderu, os X, Y i Z. Krokové motory pro osu Z jsou dva z důvodu vyrovnání tiskové podložky. Dále jsou připojeny mechanické koncové spínače pro osy X, Y i Z. Pro osu Z jsou připojeny koncové spínače na obou stranách, které v kombinaci se dvěma motory slouží k přesnému dorovnání tiskové podložky. Pro výhřev tiskové hlavy je připojeno vyhřívací těleso 24V/40W. K měření teploty tiskové hlavy je připojen NTC 100k termistor. Dále jsou k jednotce připojeny ventilátory. Jeden z nich slouží k ochlazování tiskové hlavy (30x30x10), aby nedocházelo k natavování materiálu před tryskou a tím se ucpávala tisková hlava. Druhý ventilátor je radiální a slouží k ofuku výtisku při tisku (40x40x20). Tisková hlava je propojena s řídicí jednotkou pomocí konektoru CAN 15 pro snadnější manipulaci, či výměněnu. Na obrázku č. 4.2 je znázorněno rozložení zapojení jednotlivých pinů

konektoru. Motor dopravníku je připojen k podpůrné řídicí jednotce s programovatelnou jednotkou Arduino Nano. Řízení motoru dopravníku zajišťuje obvod A4988 pro řízení krokových motorů, který je ovládán pomocí Arduina. Dále jsou k podpůrné řídicí jednotce připojeny dva koncové spínače. Kompletní schéma viz. přílohy B.



- 1 - termistor (+)
- 2 - topné těleso (-)
- 3 - topné těleso (-)
- 4 - nezapojeno (rezerva)
- 5 - nezapojeno (rezerva)
- 6 - nezapojeno (rezerva)
- 7 - ventilátor (-)
- 8 - ventilátor (+)
- 9 - termistor (-)
- 10 - topné těleso (+)
- 11 - topné těleso (+)
- 12 - nezapojeno (rezerva)
- 13 - nezapojeno (rezerva)
- 14 - ventilátor ofuk (-)
- 15 - ventilátor ofuk (+)

Obr. 4.2: Rozložení pinů konektoru CAN 15.

5 Softwarové vybavení

Pro přípravu dat k tisku je nutné 3D model vyexportovat např. do formátu s příponou ".stl". Formát typu STL popisuje pouze geometrii povrchu 3D modelu. Nepopisuje barvy ani textury modelu. V případě nutnosti zachovat barevnost modelu slouží formát VRML. Jedná se o zkratku Virtual Reality Modeling Language. Tyto barevné modely nesou příponu ".wrl". Dále je nutné tyto soubory převést do formátu, který je schopen firmware tiskárny zpracovat. Firmware pracuje s tzv. G-kódy. Jedná se o sekvenci příkazů. Na začátku zpravidla, zjištění výchozí pozice tiskové hlavy, nastavení teploty trysky, atd. viz. obrázek č.5.1. Dále následuje posloupnost souřadnicových G-kódů, které reprezentují tisknutý model. K převodu z STL formátu na G-kód slouží Slicer.

5.1 Slicer

Označení slicer pochází z anglického slova slice-řezat. Jedná se o software, který nařeže model ve vertikální ose na jednotlivé vrstvy. Pro každou vrstvu vygeneruje sekvenci souřadnic pro osy X a Y, po kterých se pohybuje tisková hlava. Slicer umožňuje nastavení spousty parametrů, které mohou ovlivnit kvalitu tisku. Od úplně základního nastavení tiskové teploty, rychlosti tisku, výšky vrstvy až po vkládání vlastních skriptů v podobě G-kódů na začátek či konec tisku. Možnost vložení a modifikaci koncového G-kódu jsem využil pro funkci automatického vykládání. Mezi nejpoužívanější slicery momentálně patří:

- Simplify3D
- Cura
- Slic3r

Pro odladění tiskového profilu pro sestavenou tiskárnu jsem použil slicer Simplify 3D ve verzi 4.0.0. Tiskový profil je uložen na přiloženém CD.

```

G90
M82
M106 S0
M140 S60
M190 S60
M104 S220 T0
M109 S220 T0
G28 ; home all axes
G1 Z5 F3000 ; lift
G1 X40 Y2 F1500 ; avoid binder clips
G1 Z0.2 F3000 ; get ready to prime
G92 E0 ; reset extrusion distance
G1 X120 E10 F600 ; prime nozzle
G1 X150 F5000 ; quick wipe
G92 E0
G1 E-7.5000 F3000
G1 Z0.200 F1002
; process Process1
; layer 1, Z = 0.200
T0
; tool H0.200 W0.480
; skirt
G1 X131.304 Y151.479 F4800
G1 E0.0000 F900
G92 E0
G1 X131.593 Y151.383 E0.0122 F1800
G1 X163.576 Y154.489 E1.2947
G1 X163.590 Y154.491 E1.2952
G1 X163.796 Y154.519 E1.3035
G1 X163.810 Y154.521 E1.3041
G1 X164.431 Y154.631 E1.3292
G1 X164.458 Y154.636 E1.3303
G1 X164.855 Y154.738 E1.3467
G1 X164.881 Y154.746 E1.3478
G1 X165.579 Y154.983 E1.3772
G1 X165.605 Y154.993 E1.3783
G1 X165.989 Y155.157 E1.3950
G1 X166.014 Y155.169 E1.3961
G1 X166.676 Y155.516 E1.4259
G1 X166.701 Y155.531 E1.4271

```

Obr. 5.1: Ukázka G-kódu.

5.2 Firmware

Firmware tiskárny zajišťuje komunikaci procesoru s jednotlivými prvky, či periferiemi řídicí jednotky. V reálném čase obsluhuje chod tiskárny. Vyhodnocuje vstupní signály jako je například teplota trysky a pomocí regulátoru ji reguluje na požadovanou teplotu. Firmware se především stará o čtení G-kódu, který převádí na jednotlivé instrukce (pohyb motorů, změna rychlosti pohybu, atd.). Mezi nejrozšířenější firmware pro 3D tiskárny patří Marlin [13].

5.2.1 Marlin

Marlin je open source firmware, který vznikl při projektu RepRap. Byl odvozen od firmwarů Sprinter a Grbl. Samotným open source projektem se stal 12. srpna 2011, kdy byl vydán na Githubu. Marlin je licencován pod GPLv3 (General Public License verze 3), což umožňuje jeho neomezené šíření. Jako důkaz funkčnosti firmwaru Marlin je, že jej používají i komerční producenti 3D tiskáren (Ultimaker, Printrbot, Prusa Research). Marlin umožňuje řídit nejen 3D tiskárny, ale i CNC stroje (frézka, laser). Nejvíce se rozšířil díky své podpoře levných 8-bit mikrokontrolerů. S příchodem verze 2.0 Marlin podporuje i 32-bitové mikrokontrolery. Aktivní komunita uživatelů stále přidává nové funkce nebo vylepšení [13].

6 PID regulátor

Důležitým prvkem každé 3D tiskárny je bezpochyby regulace teploty. Teplotu je nezbytné regulovat u extruderu tak i u tiskové podložky, popřípadě boxu tiskárny. Největší nárok na kvalitu regulace je kladen u extruderu, který zajišťuje natavování tiskové struny na přesně definovanou teplotu. Pomocí PID regulátoru je teplota udržována na žádané hodnotě. Regulátor se skládá ze tří složek, P - proporciální, I - integrační, D - derivační [14]. PID regulátor lze popsat rovnicí:

$$F_R(p) = K_R \left(1 + T_D p + \frac{1}{T_I p} \right) [14] \quad (6.1)$$

Kde K_R - zesílení regulátoru [-], T_D - derivační časová konstanta [s], T_I - integrační časová konstanta [s].

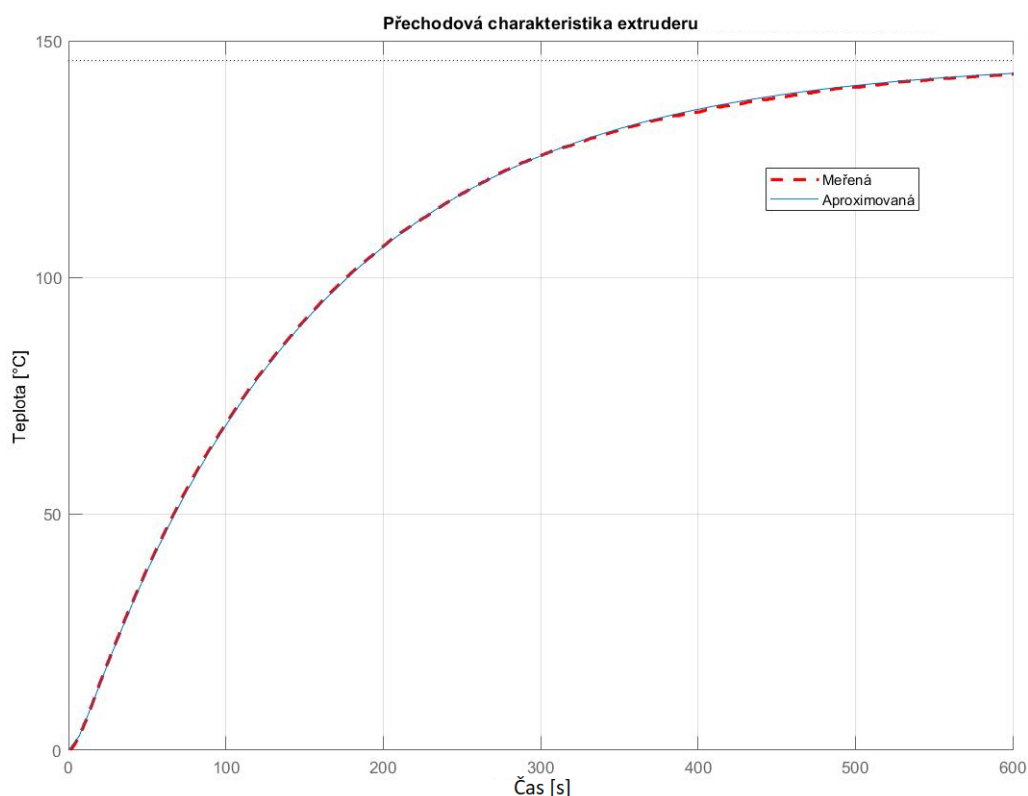
6.1 Identifikace soustavy

Před návrhem regulátoru je nutné znát matematický model regulované soustavy. Existuje množství postupů, kterými lze navrhnout řízení i bez popisu vlastností soustavy. Ty využíváme pouze v krajních případech, kdy je sestavení matematického modelu velmi obtížné, či nemožné. Pro linearizované soustavy zpravidla není příliš obtížné sestavit přibližný model soustavy. Dospět k němu lze několika způsoby, analyticky, tj. formulací diferenciálních nebo diferenčních rovnic nebo experimentálně. Analytická identifikace spočívá v popisu fyzikálně chemických dějů probíhajících v soustavě. Experimentální identifikace se provádí měřením statických i dynamických vlastností reálného objektu. K identifikaci soustavy extruderu jsem vybral experimentální měřicí metodu. Tuto metodu lze rozdělit na dvě varianty podle použitého vstupního signálu [14].

- Měření přechodové charakteristiky (vhodné pro soustavy s časovými konstantami v řádech jednotek až tisíců sekund)
- Měření s použitím harmonického signálu (vhodné pro rychlejší soustavy, nutné odhadnout frekvenční rozsah ve kterém se dynamické vlastnosti soustavy projeví)

6.2 Měření přechodové charakteristiky extruderu

Na vstup soustavy (topné těleso extruderu) jsem připojil obdelníkový signál (24V) se střídou 25%. Pomocí termistoru měřil a zaznamenával teplotu dokud neodezněl přechodný děj. Naměřená data jsem importoval do programu Matlab, kde jsem provedl normalizaci (odečtení počáteční teploty) a určil inflexní bod přechodové charakteristiky. Následně vedl tečnu v tomto bodě. Průsečík tečny a přímky vedené v nulové teplotě určil první časovou konstantu soustavy tzv. dobu průtahu T_u . Průsečík tečny a přímky vedené v maximální teplotě určil druhou časovou konstantu po odečtení doby průtahu získáme dobu náběhu T_n . Jelikož je charakteristika normalizována, tak je možné zesílení soustavy určit pomocí maximální dosažené teploty.



Obr. 6.1: Přechodová charakteristika extruderu.

Výsledná aproximovaná soustava druhého řádu:

$$F_S(p) = \frac{k}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)} = \frac{145.8}{(5p + 1)(149p + 1)} \quad (6.2)$$

Z obrázku č. 6.1 je vidno, že se charakteristiky překrývají a aproximovaná charakteristika odpovídá naměřené.

6.3 Návrh regulátoru metodou Ziegler-Nichols

Pro srovnání kvality regulace automatické kalibrace, kterou nabízí firmware Marlin 2.0 a vlastního návrhu jsem vybral metodu Ziegler-Nicholse. V praxi je velmi oblíbená a hojně používána kvůli své jednoduchosti [14]. Při návrhu vycházím z obecné rovnice pro PID regulátor 6.1.

6.3.1 Určení kritických parametrů z přechodové charakteristiky

K určení kritických parametrů můžeme využít již získaných dat v podobě doby průtahu T_u a doby náběhu T_n z přechodové charakteristiky. Pro kritické parametry platí přibližné vztahy [14]:

$$K_{krit} \doteq \frac{\pi T_n}{2 T_u} + 1 \doteq \frac{\pi 149}{2 \cdot 5} + 1 \doteq 47,81 \quad (6.3)$$

$$T_{krit} \doteq 4 \cdot T_u = 4 \cdot 5 = 20 \text{ s} \quad (6.4)$$

6.3.2 Výpočet parametrů PID regulátoru

Pro výpočet parametrů PID regulátoru metodou Z-N slouží tabulka se vzorci uvedenými na obrázku č. 6.2.

Typ regulátoru	K_R	T_I	T_D
P	$K_R = 0.5K_{krit}$	-	-
PI	$K_R = 0.45K_{krit}$	$T_I = 0.85T_{krit}$	-
PD	doladíme na optimální hodnotu	-	$T_D = 0.12T_{krit}$
PID	$K_R = 0.6K_{krit}$	$T_I = 0.5T_{krit}$	$T_D = 0.125T_{krit}$

Obr. 6.2: Vzorce pro návrh parametrů regulátoru metodou Ziegler-Nicholse.

[14]

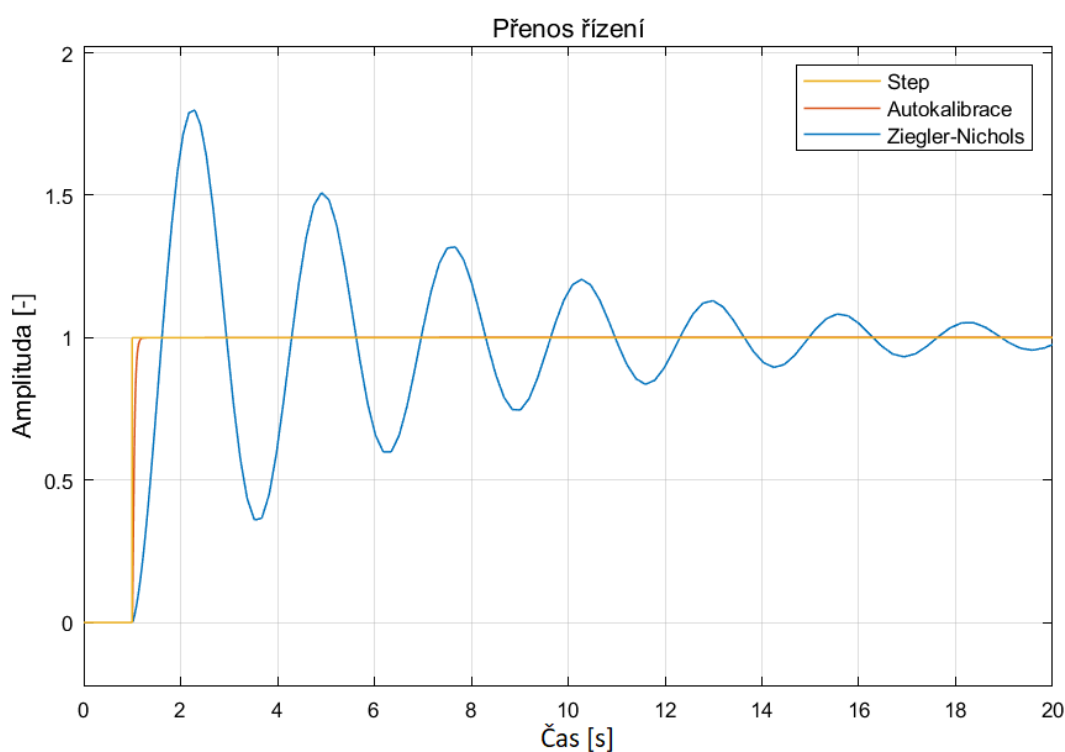
$$K_R = 0,6 \cdot K_{krit} = 0,6 \cdot 47,81 = 28,69 \quad (6.5)$$

$$T_I = 0,5 \cdot T_{krit} = 0,5 \cdot 20 = 10 \text{ s} \quad (6.6)$$

$$T_D = 0,125 \cdot T_{krit} = 0,125 \cdot 20 = 2,5 \text{ s} \quad (6.7)$$

6.4 Zhodnocení kvality regulace Z-N metody

K demonstraci navrženého regulátoru jsem vytvořil simulaci, při které jsem sledoval zejména přenos řízení. Přenos řízení by měl ideálně kopírovat jednotkový skok, který je použit jako vstupní signál. Za obrázku č. 6.3 je graficky znázorněno, že regulátor navržený pomocí metody Ziegler-Nicholse je velmi kmitavý a nesplňuje požadavky na regulaci teploty extruderu. Zejména kvůli vysokému překmitu a dlouhé doby ustálení. Kvůli nevyhovujícímu výsledku metodou Z-N jsem se rozhodl navrhnout regulátor metodou Chien–Hrones–Reswick.



Obr. 6.3: Přenos řízení Z-N.

6.5 Návrh regulátoru metodou Chien–Hrones–Reswick

Název metody nese příjmení autorů, kteří tuto metodu odvodili. Metoda je odvozena z původní metody Z-N. Metoda umožňuje volbu vyregulování žádané hodnoty bez překmitu nebo s 20% překmitem [15]. Před návrhem regulátoru je nutné z přechodové charakteristiky určit parametry: **a**, **T** a **L**.

Odečtené hodnoty z přechodové charakteristiky jsou:

$$a = 4,89$$

$$T = T_n = 149 \text{ s}$$

$$L = T_u = 5 \text{ s}$$

Pro výpočet koeficientů PID regulátoru bez překmitu žádané hodnoty slouží vztahy [15]:

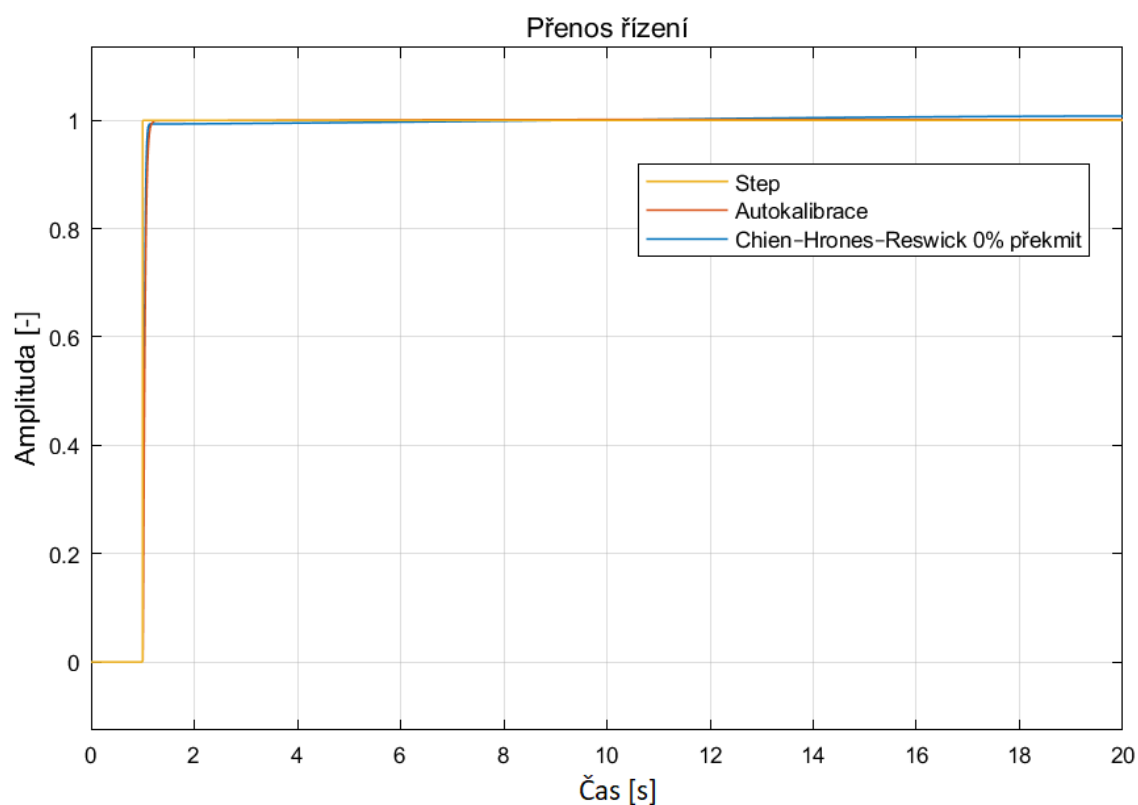
$$K_R = \frac{0,6}{a} = \frac{0,6}{4,89} \doteq 0,12 \quad (6.8)$$

$$T_I = T = 149 \text{ s} \quad (6.9)$$

$$T_D = 0,5 \cdot L = 0,5 \cdot 5 = 2,5 \text{ s} \quad (6.10)$$

6.6 Zhodnocení kvality regulace CHR metody

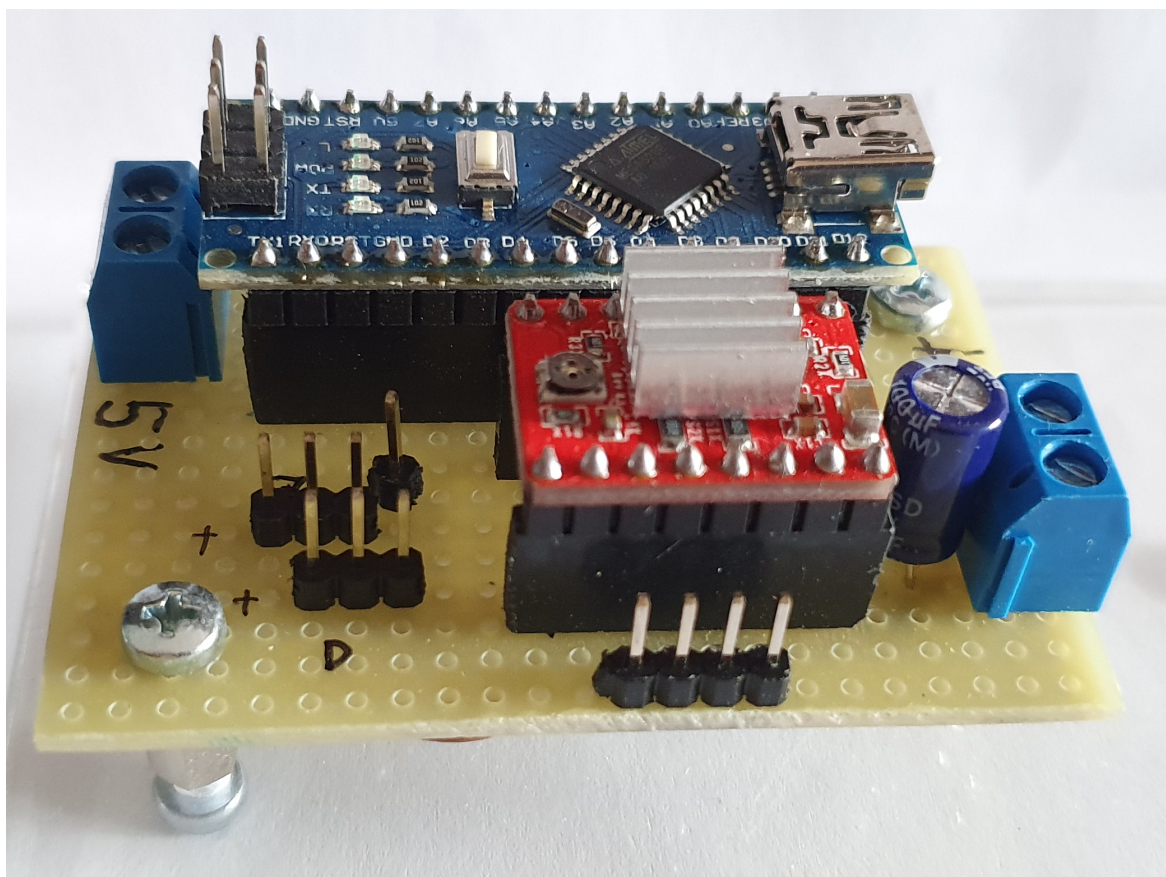
Na obrázku č. 6.4 je vyobrazen přenos řízení za použití metody CHR. V porovnání s metodou Z-N nedochází k překmitu a sledování žádané hodnoty je přesnější. Avšak stále vychází lépe regulátor navržený pomocí autokalibrace pomocí firmwaru Marlin. K dosažení lepších výsledků by pomohlo aproximovat regulovanou soustavu vyšším řádem.



Obr. 6.4: Přenos řízení CHR.

7 Automatické vykládání - pásový dopravník

K oživení automatického vykládání byla vytvořena jednoduchá DPS. Na univerzální desku plošného spoje jsem umístil programovatelnou jednotku Arduino nano, motorový driver A4988 a konektory pro připojení. K DPS je připojen krokový motor, koncové spínače a napájení. Arduino nano je napájeno ze zdroje 5V. Krokový motor má oddělené napájení 24V.

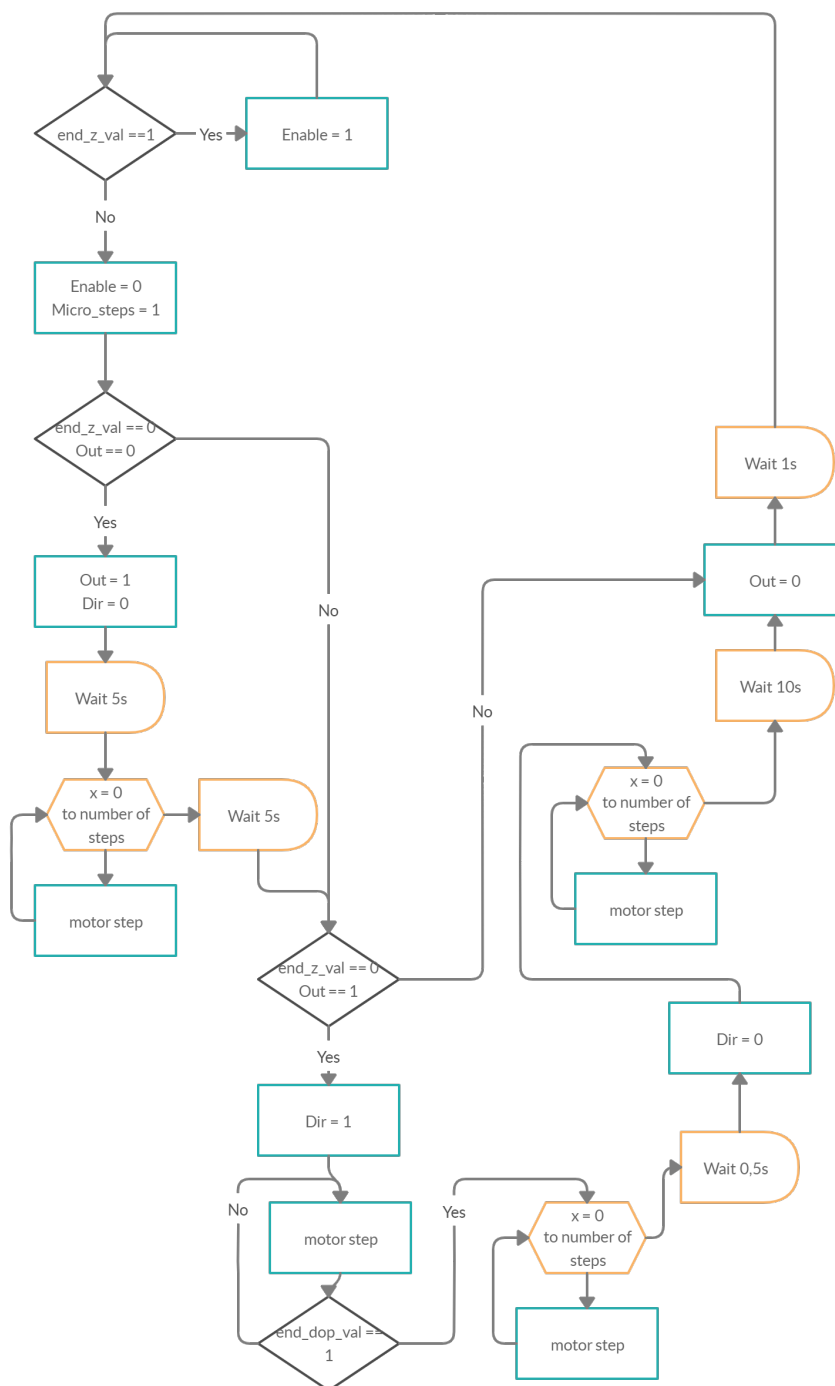


Obr. 7.1: DPS řízení dopravníku.

Proces automatického vykládání je spuštěn v momentu, kdy tisková plocha dosáhne maximální polohy v ose Z a dojde k sepnutím koncového spínače. K dosažení téhle polohy byl přidán do koncového G-kódu prostřednictvím sliceru příkaz, který po dokončení tisku zajistí posun tiskové plochy až na koncový spínač. Po sepnutí spínače dojde k aktivaci motorového driveru společně s aktivací mikrokrokování. Následně proběhne vysunutí tiskové podložky a prodleva 5s. Po uplynutí 5s prodlevy se motor reverzuje a následuje proces zasouvání podložky až do chvíle, kdy je sepnut koncový spínač dopravníku. Jelikož je koncový spínač dopravníku odsazen od hliníkové podložky je nutné tiskovou podložku opět mírně vysunout, aby byla přesně na

svém místě. Kompletní vývojový diagram je na obrázku č. 7.2. Program pro řízení dopravníku je uložen na přiloženém CD.

7.0.1 Vývojový diagram softwaru pro pásový dopravník

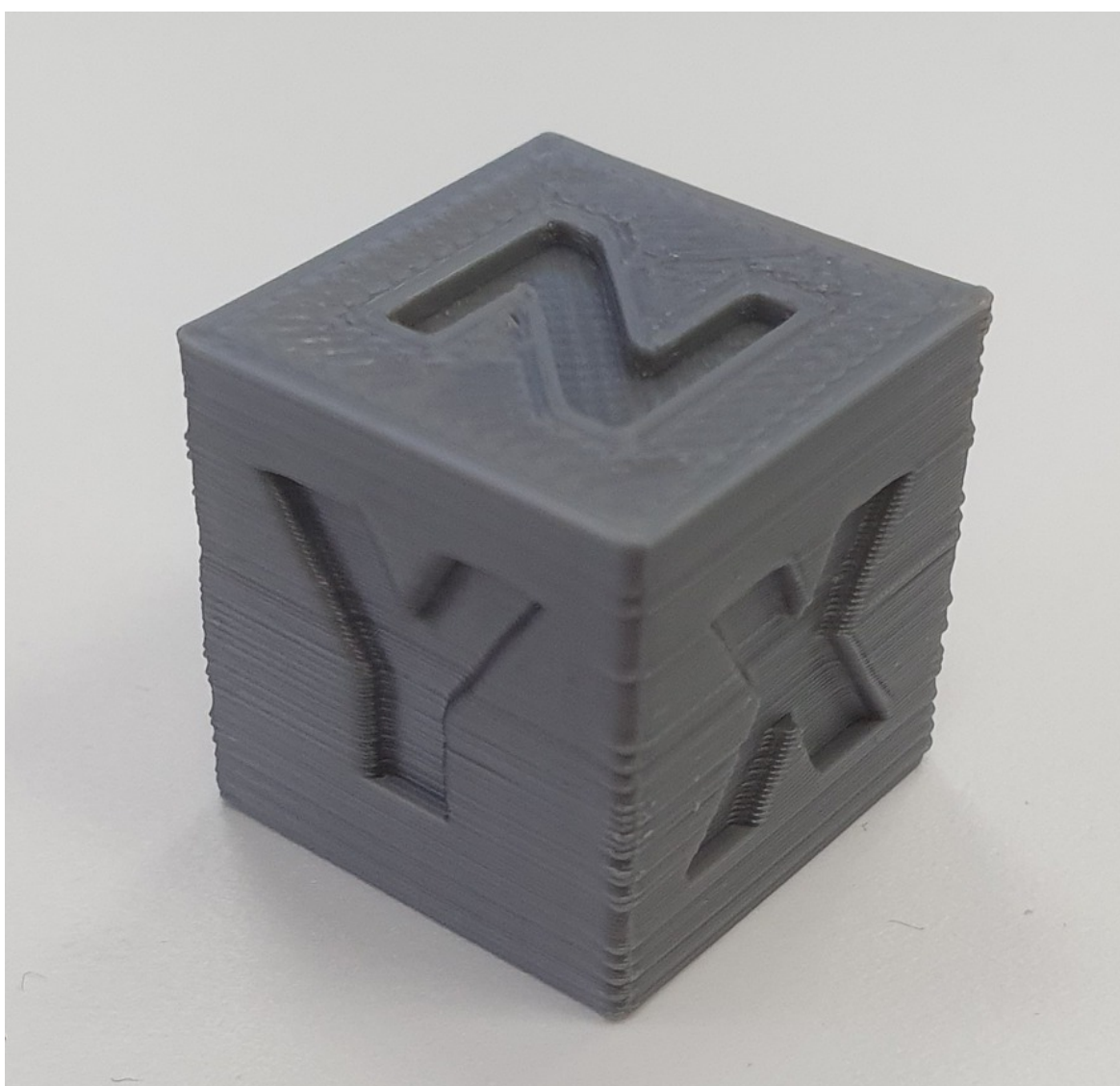


Obr. 7.2: Vývojový diagram softwaru pro pásový dopravník.

8 Ověření funkčnosti a vyhodnocení dosažených vlastností

8.1 Kalibrace před prvním tiskem

Před prvním tiskem na nově sestavené tiskárně je nutné ve firmwaru nastavit spoustu hodnot. Mezi nejdůležitější patří nastavení počtu kroků na milimetr pro jednotlivé osy X,Y i Z. Nezbytné je upravit kroky motoru extruderu tak, aby bylo vytlačováno přesně zvolené množství tiskové struny. Po nastavení všech potřebných parametrů jsem spustil první tisk kalibrační kostky.



Obr. 8.1: První výtisk kalibrační kostky.

Na prvním výtisku vyobrazeném na obrázku č. 8.1 se projevilo několik chyb. Viditelný defekt způsobilo nedostatečné napnutí řemenů. Dále proběhla rozměrová korekce a korekce šířky extruze materiálu.

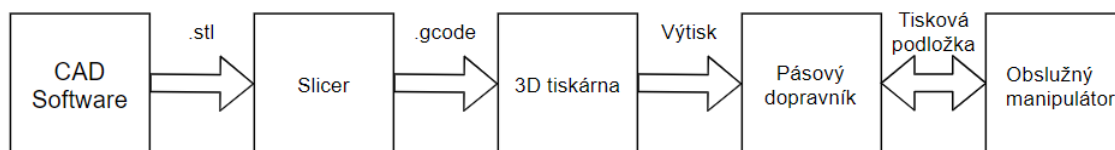


Obr. 8.2: Kalibrační kostka tištěná s jedním perimetrem.

Na obrázku č. 8.2 je již patrné zlepšení kvality tisku. Tisknutá kostka má přesné rozměry i správnou šířku stěny. Kostka byla tištěna z materiálu PET-G pomocí tzv. Vase módu, tzn. spirálovitý tisk jedním perimetrem bez výplně.

8.2 Rozšířený proces 3D tisku

Na obrázku č. 8.3 je blokově znázorněn proces 3D tisku, který je doplněn o funkci automatické výměny tiskové podložky. Před samotným tiskem je nutné 3D model uložit ve správném formátu a následně jej připravit pro tisk pomocí sliceru, jak již bylo detailněji popsáno v kapitole 5 a 5.1. Z vygenerovaných dat, které jsou výstupem sliceru je již tiskárna schopná model vytisknout. Po dokončení tisku dojde k vysunutí tiskové podložky a předání obslužnému manipulátoru. Manipulátor se postará o výměnu potisknuté podložky za prázdnou a předá ji pásovému dopravníku na tiskárně, který ji následně uloží na své místo.



Obr. 8.3: Blokové schéma rozšířeného procesu 3D tisk.

Závěr

Závěrem bych rád shrnul celkový postup při návrhu, elektifikaci, sestavení a oživení 3D tiskárny. Celá konstrukce 3D tiskárny je navržena v grafickém prostředí SolidWorks. Dále je navržena kompletní elektrická část, včetně pojistky i bezpečnostních okruhů. Nejnáročnější bylo vymyslet a zkonstruovat nápad automatického vykládání. Postupným upravováním mechanismu dopravníku jsem dospěl k finálnímu řešení, které je znázorněno na obrázku č. 2.6. Při stavbě se nevyskytl žádný závažnější problém.

V teoretické části je stručně popsána historie 3D tisku. Dále jsou popsány nejrozšířenější technologie tisku. Detailněji je popsána technologie FDM/FFF, kterou používá navržená a sestavená tiskárna. Popsány jsou též nejběžnější materiály používané při této technologii tisku.

Následuje konstrukční řešení a výběr elektrických komponent. Při výběru řídicí jednotky byl nejdůležitější parametr 32-bit procesor, vyměnitelné motorové drivery a napájení 24V. K výběru krokových motorů pro pohon jednotlivých os byly vypočítány pohybové rovnice dokazující dostatečnou momentovou rezervu. Z důvodu zvolení vyhřívané podložky na 230V bylo nutné použití SSR. Mechanické koncové spínače byly zvoleny díky své jednoduchosti a velmi příznivé ceně. Následuje popis elektrického schématu a obrázek s rozložením pinů konektoru extruderu. Dále je popsán software používaný při 3D tisku.

V následující kapitole jsem se věnoval návrhu regulátoru pro extruder. Regulovanou soustavu jsem identifikoval pomocí měření přechodové charakteristiky. Po zjištění přenosu soustavy jsem navrhl regulátor metodou Ziegler-Nichols. Výsledky regulace jsem porovnával s možností použití autokalibrace pomocí firmwaru Marlin. Na obrázku č. 6.3 jsou vyobrazeny přenosy řízení, jak s možností autokalibrace PID, tak s výpočtem konstant PID metodou Z-N. Ukázalo se, že metoda Z-N je nevhodná. Zejména kvůli velkému překmitu a dlouhé doby ustálení. Rozhodl jsem se ještě navrhnout regulátor pomocí metody CHR, při které jsem dosáhl lepšího výsledku, avšak tato metoda taktéž nepřekonala dosažených výsledků pomocí autokalibrace. Proto jsem se rozhodl využít možnost autokalibrace a použil konstanty pro PID regulátor získané pomocí firmwaru Marlin. Následně jsem se věnoval kalibraci tiskárny a vyladění tiskového profilu. Po několika krocích jsem dospěl k finálnímu tiskovému profilu, který je uložen na přiloženém CD. Poté jsem přešel k vyladění posledních detailů při automatickém vykládání tiskové podložky. Program k obsluze pásového dopravníku je přizpůsoben situaci, kvůli které nemohl být obslužný manipulátor sestaven, avšak bylo nutné otestovat funkčnost systému.

Literatura

- [1] *NewScientist*. *Newscientist* [online]. Vydání časopisu 3099, 2016 [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <https://www.newscientist.com/letter/mg23230991-100-1-editors-pick-3d-printing-you-read-it-here-first/>.
- [2] *Patents*. *Patents.google* [online]. [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US4575330>.
- [3] *Materialpro3d*. *Materialpro3d* [online]. 2019 [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>.
- [4] *Materialpro3d*. In: *Materialpro3d* [online]. materialpro3d: materialpro3d, 2019 [cit. 2019-12-27]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/elektro-dily/krokovy-motor-nema-sx17-1005vlqcef/>.
- [5] *Mk-eshop*. *Mk-eshop* [online]. mk-eshop: mk-eshop [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: <https://mk-eshop.cz/blog/post/8-prehled-materialu-pro-3d-tisk>.
- [6] *Patents*. *Patents.google* [online]. [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/DE19649865C1/en>.
- [7] *Printing-technology*. *All3dp* [online]. 2019 [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>.
- [8] *Extruder-technology*. *All3dp* [online]. [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/direct-vs-bowden-extruder-technology-shootout/>.
- [9] *Technologie 3D tisku* [online]. In: . web, 2017 [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>.
- [10] *Síťový konektor C14*. In: *TME* [online]. TME: TME, 2019 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/4304.6058/konektory-iec-60320/schurter/>.
- [11] *KREJČIŘÍK, Alexandr. SSR - Solid State relé*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-081-4..
- [12] *Koncové spínače*. In: *Marlinfw* [online]. marlinfw: marlinfw, 2020 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://marlinfw.org/docs/hardware/endstops.html>.

- [13] *Marlinfw [online]. Marlinfw: Marlinfw, 2020 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://marlinfw.org/>.*
- [14] *BLAHA, Petr a Petr VAVŘÍN. Řízení a regulace 1 [online]. V 1.3.8. Brno: VUT Brno, 2005 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbmxyaXplbmhcmVndWxhY2UxfGd4OjYxNTNlYmMONTJjYmViZTE>.*
- [15] *Researchgate [online]. researchgate: researchgate, 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/273481857_Comparison_Between_Three_Tuning_Methods_of_PID_Control_for_High_Precision_Positioning_Stage.*

Seznam příloh

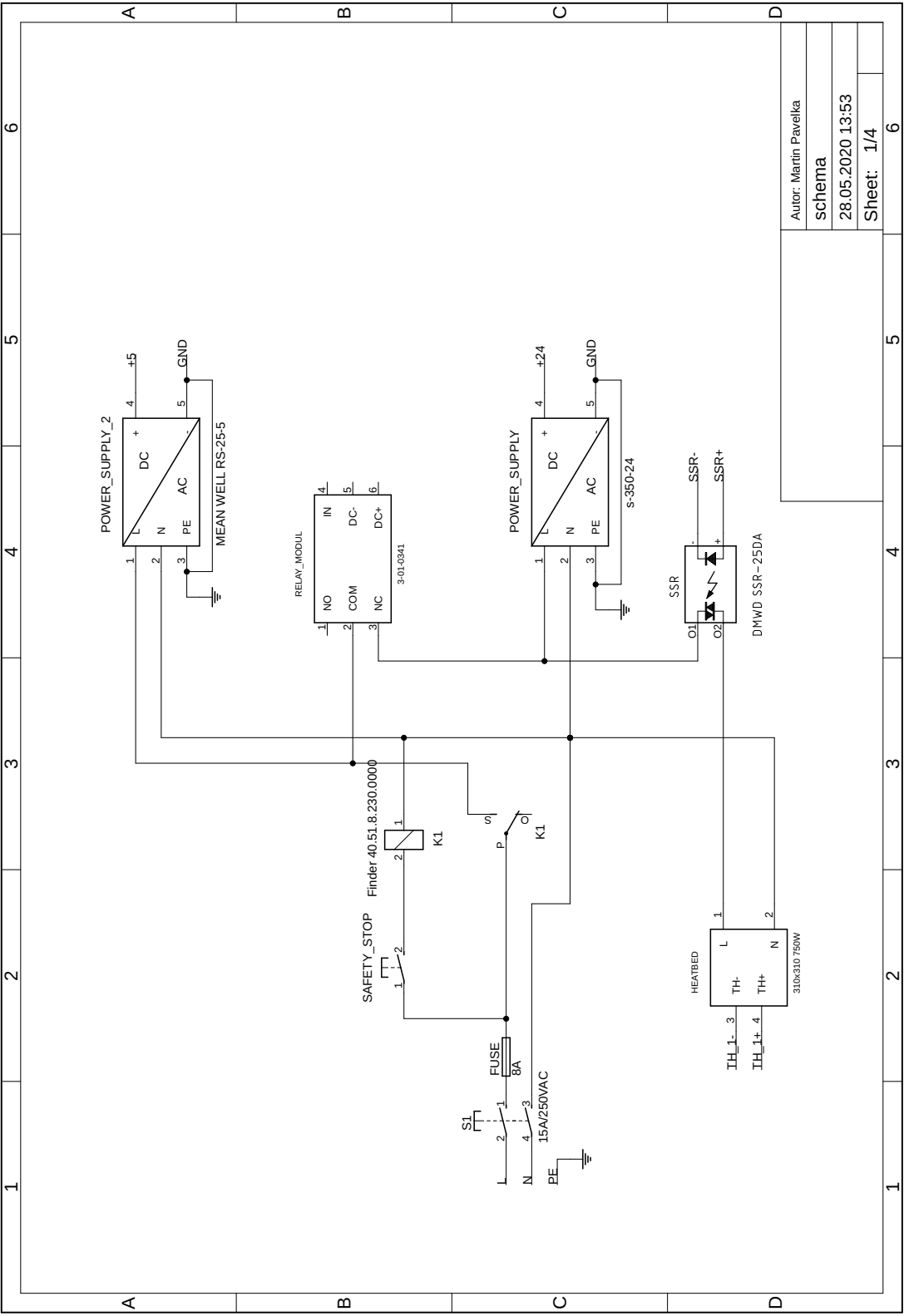
A	Obsah přiloženého CD	51
B	Elektrické schéma	52
B.1	Elektrické schéma 1. list	52
B.2	Elektrické schéma 2. list	53
B.3	Elektrické schéma 3. list	54
B.4	Elektrické schéma 4. list	55

A Obsah přiloženého CD

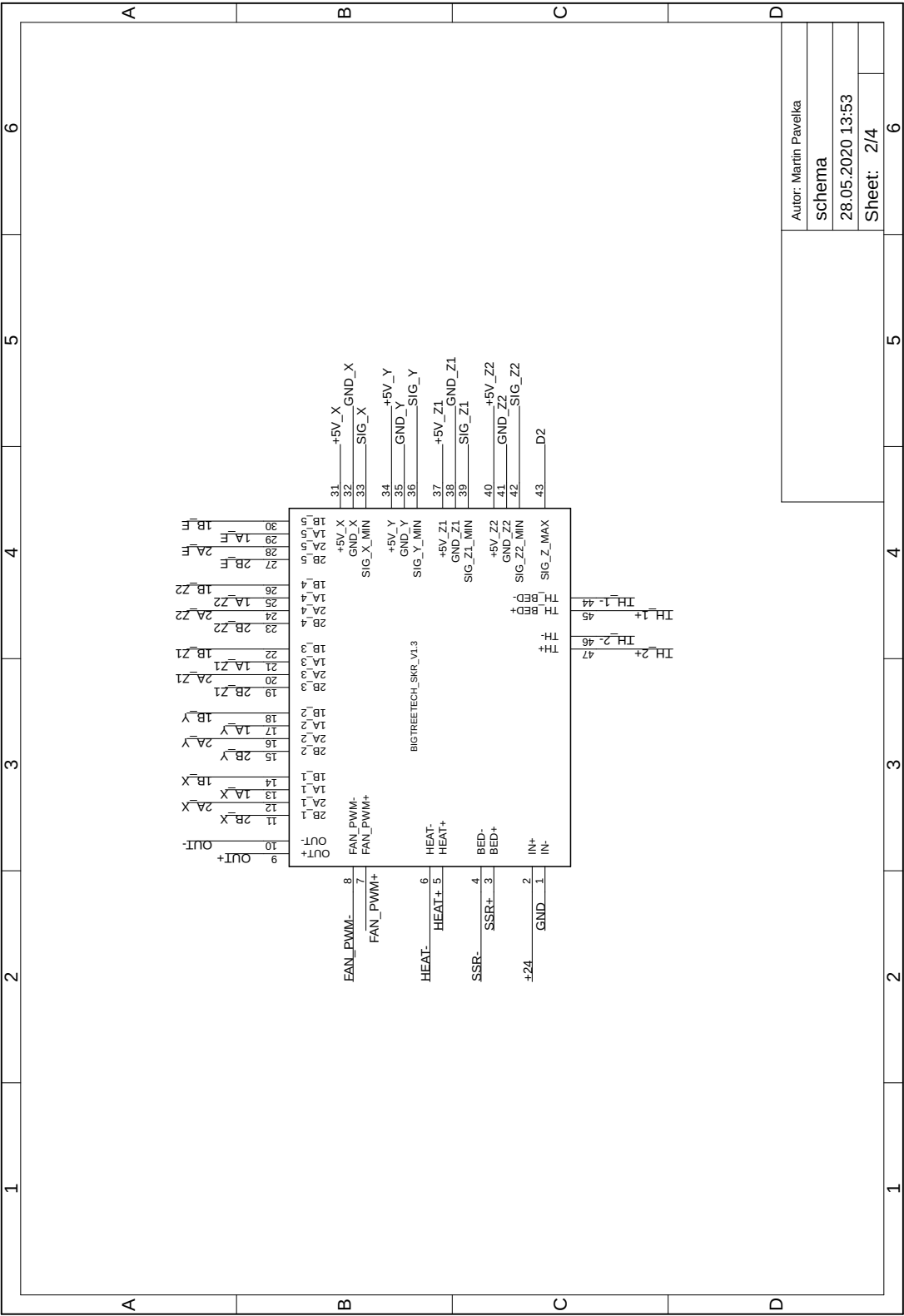
```
/
├─ bakalarska_prace_Pavelka.pdf
├─ navrh_tiskarna.zip
├─ zdrojove_soubory_Marlin_2.zip
├─ firmware.cur
├─ tiskovy_profil_S3D.zip
├─ program_pasovy_dopravnik.zip
├─ schema_list_1.pdf
├─ schema_list_2.pdf
├─ schema_list_3.pdf
└─ schema_list_4.pdf
```


B Elektrické schéma

B.1 Elektrické schéma 1. list



B.2 Elektrické schéma 2. list



Autor: Martin Pavelka

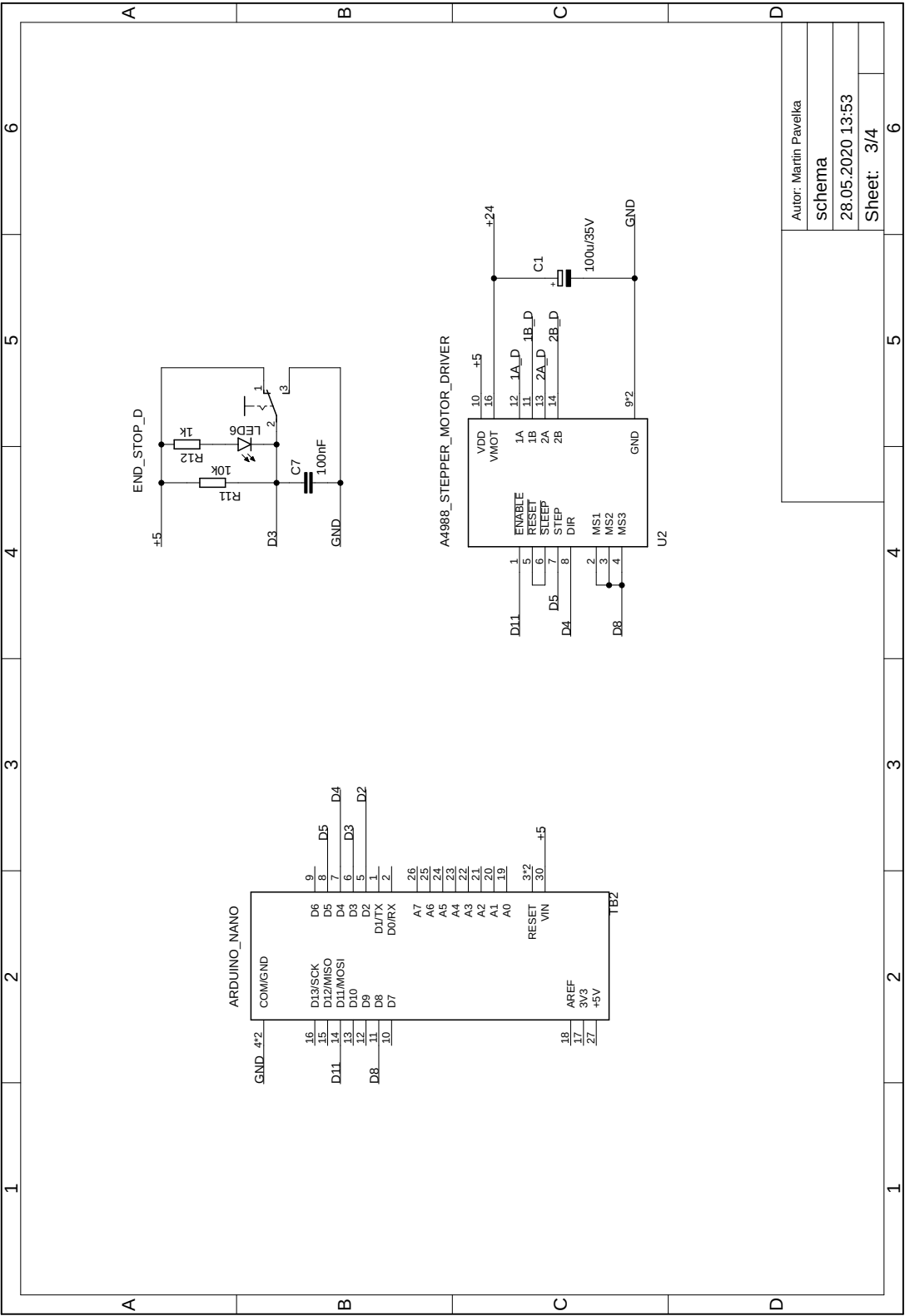
schema

28.05.2020 13:53

Sheet: 2/4

6

B.3 Elektrické schéma 3. list



Autor: Martin Pavelka

schema

28.05.2020 13:53

Sheet: 3/4

B.4 Elektrické schéma 4. list

